

Universidad de **Cádiz**

Proyectos de fin de carrera de **Ingeniería Química**

Facultad: CIENCIAS

Titulación: INGENIERÍA QUÍMICA

Título: DISEÑO DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE FORMALDEHIDO. PARTE 2: DISEÑO DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE FORMALDEHIDO A PARTIR DE METANOL

Autor: Miguel TINOCO RIVAS

Fecha: Junio 2010







## **DOCUMENTOS DEL PROYECTO:**

DISEÑO DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE FORMALDEHIDO.  
PARTE 2: DISEÑO DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE  
FORMALDEHIDO A PARTIR DE METANOL.

### **A. Título**

### **B. Memoria**

#### **B.1. Memoria Descriptiva**

#### **B.2. Anexos**

### **C. Planos**

### **D. Pliego de Condiciones**

### **E. Presupuesto**

## **B. MEMORIA**

### **B.1. MEMORIA DESCRIPTIVA**



## ÍNDICE

<b>1. Antecedentes .....</b>	<b>6</b>
1.1. Proceso en planta .....	6
1.2. Interacciones entre ambos procesos .....	9
1.3. Características globales de la planta .....	10
<b>2. Introducción .....</b>	<b>12</b>
2.1. Gas natural y su industria .....	13
2.2. Aplicaciones del formaldehído .....	14
2.3. Comercio del formaldehído y empresas.....	16
2.4. Perspectivas de futuro.....	19
<b>3. Objeto del proyecto .....</b>	<b>21</b>
<b>4. Viabilidad del proyecto .....</b>	<b>22</b>
4.1. Viabilidad técnica .....	22
4.1.1. Proceso y alternativas del proceso .....	22
4.1.1.1. Planta basada en catalizadores de plata .....	22
4.1.1.2. Planta basada en catalizadores de óxidos metálicos .....	23
4.1.2. Comparativa de ambas plantas.....	24
4.1.3. Desviaciones frente al proceso general .....	25
4.2. Viabilidad económica.....	26
4.3. Viabilidad legal.....	27
<b>5. Localización de la planta .....</b>	<b>29</b>
5.1. Elección de la localización .....	29
5.2. Ventajas de la zona escogida .....	32
5.3. Características de la zona .....	33
<b>6. Distribución del proceso.....</b>	<b>36</b>
6.1. Distribución en planta .....	36
6.2. Distribución del proceso en estudio.....	41
6.3. Distancias mínimas entre equipos .....	43
<b>7. Materias primas y productos.....</b>	<b>45</b>
7.1. Materias primas .....	45
7.1.1. Metanol .....	45
7.1.2. Catalizador.....	46

7.2. Servicios generales .....	46
7.2.1. Agua .....	46
7.2.2. Aire .....	47
7.2.3. Electricidad.....	48
7.2.4. Material de aislamiento .....	48
7.3. Producto .....	49
<b>8. Proceso de obtención de formaldehído .....</b>	<b>51</b>
8.1. Descripción del proceso .....	51
8.1.1. Recepción y almacenamiento de materias primas .....	51
8.1.2. Acondicionamiento de materias primas .....	52
8.1.3. Reacción .....	52
8.1.4. Enfriamiento.....	52
8.1.5. Acondicionamiento del producto .....	53
8.1.6. Almacenamiento del producto .....	54
<b>9. Diseño del intercambiador IC-01.....</b>	<b>55</b>
9.1. Criterios para el diseño del intercambiador.....	55
9.1.1. Elección del tipo de intercambiador .....	55
9.1.2. Normativa y código de diseño de intercambiadores de carcasa y tubos.....	57
9.1.3. Selección de la trayectoria de flujo .....	59
9.2. Diseño del intercambiador IC-01 .....	59
9.2.1.Elementos fundamentales del intercambiador .....	59
9.2.2. Características del intercambiador .....	62
<b>10. Diseño del intercambiador IC-02.....</b>	<b>63</b>
10.1..Elementos fundamentales del intercambiador .....	63
10.2. Características del intercambiador .....	64
<b>11. Diseño del reactor R-01 .....</b>	<b>65</b>
11.1. Tipo de reactor .....	65
11.2. Catalizador .....	68
11.2.1.Características del catalizador.....	68
11.2.2. Condiciones de operación .....	69
11.2.3. Cinética .....	70
11.3. Diseño del reactor.....	70
11.3.1. Selección de la trayectoria de flujo y caracterización de las corrientes .....	71
11.3.2. Elementos fundamentales del reactor.....	71
11.3.3. Características del reactor .....	73

11.3.4. Comprobación del correcto funcionamiento .....	74
<b>12. Diseño del intercambiador IC-03.....</b>	<b>75</b>
12.1..Elementos fundamentales del intercambiador .....	75
12.2. Características del intercambiador .....	76
<b>13. Diseño del absorbedor A-01 .....</b>	<b>77</b>
13.1. Tipo de absorbedor.....	77
13.2. Cinética .....	80
13.3. Diseño del absorbedor.....	81
13.3.1. Elementos fundamentales del absorbedor .....	82
13.3.2. Características del absorbedor .....	83
<b>14. Diseño del intercambiador IC-04.....</b>	<b>84</b>
14.1..Elementos fundamentales del intercambiador .....	84
14.2. Características del intercambiador .....	85
<b>15. Diseño del mezclador M-01 .....</b>	<b>87</b>
<b>16. Diseño del sistema de almacenamiento .....</b>	<b>89</b>
16.1. Diseño de los depósitos.....	90
16.2. Cubeto de retención .....	93
<b>17. Diseño del sistema de tuberías y accesorios.....</b>	<b>94</b>
17.1. Diseño de tuberías.....	94
17.2. Accesorios .....	96
<b>18. Diseño del sistema de impulsión.....</b>	<b>100</b>
18.1. Bombas .....	100
18.2. Soplates .....	102
<b>19. Control e Instrumentación.....</b>	<b>104</b>
19.1. Variables de operación .....	105
19.2. Lazos de control en la planta .....	105
19.2.1.Control en la Sección de Reacción.....	107
19.2.2. Control en la Sección de Acondicionamiento.....	110
19.2.3. Instrumentación.....	113
<b>20. Seguridad .....</b>	<b>116</b>
20.1. Fundamentos teóricos de la seguridad .....	116
20.1.1. Legislación aplicable .....	116
20.1.2. Análisis de riesgos y establecimiento de medidas preventivas .....	117
20.1.2.1. Tipos de riesgos básicos.....	119
20.1.3 Protección individual.....	129



20.1.4. Alumbrado.....	131
20.1.5. Gestión de la seguridad.....	133
20.1.6. Higiene industrial .....	134
20.1.7. Planes de emergencia y evacuación.....	134
20.2. Seguridad en el proceso .....	135
20.2.1. Riesgo químico .....	136
20.2.2. Riesgo físico .....	140
20.2.3. Riesgo de incendio y explosión.....	142
20.2.4. Riesgo eléctrico.....	145
20.2.5. Riesgo en la manipulación de máquinas y herramientas de trabajo.....	146
20.2.6. Riesgo en la línea de proceso .....	147
20.2.7. Riesgo en el almacenamiento de productos químicos.....	148
<b>21. Mantenimiento.....</b>	<b>150</b>
21.1. Funciones del mantenimiento.....	150
21.2. Tipos de mantenimiento .....	151
21.3. Política de mantenimiento .....	154
21.4. Costes de mantenimiento .....	155
21.5. Plan de mantenimiento .....	156
21.6. Plan de mantenimiento del proceso .....	157
21.6.1. Priorización de equipos .....	158
21.6.2. Mantenimiento de los equipos .....	158
21.7. Puesta en marcha .....	164
<b>22. Medio Ambiente .....</b>	<b>165</b>
22.1. Definiciones de conceptos importantes.....	165
22.2. Normativa.....	166
22.3. Contaminación atmosférica.....	166
22.4. Contaminación de las aguas .....	168
22.5. Residuos .....	170
22.6. Ruido.....	172
22.7. Evaluación de impacto ambiental .....	172
22.7.1. Evaluación de impacto ambiental de la línea de proceso .....	174
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>176</b>

## CAPÍTULO 1: Antecedentes

El presente Proyecto Fin de Carrera (**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol**) se centra en el diseño de un proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol. Pero dicho proceso se encuentra englobado en una planta que está compuesta por el proceso en estudio y el proceso que se explica en el Proyecto Fin de Carrera “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural**”. Ambos Proyectos fueron aprobados por la Comisión de Proyectos el día 16 de Octubre de 2009.

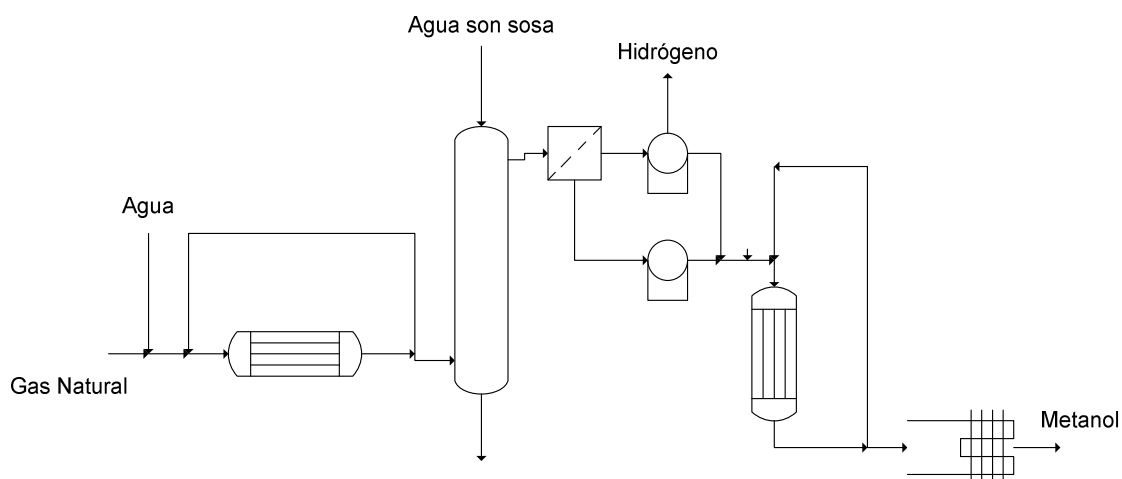
Por ello se cree conveniente, en un primer momento, el explicar someramente ambos procesos y las interacciones que surgen entre ellos, además de las características del proceso en estudio que se ven alteradas por la relación existente con el proceso diseñado en el Proyecto Fin de Carrera “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural**”.

### 1.1. Proceso en planta

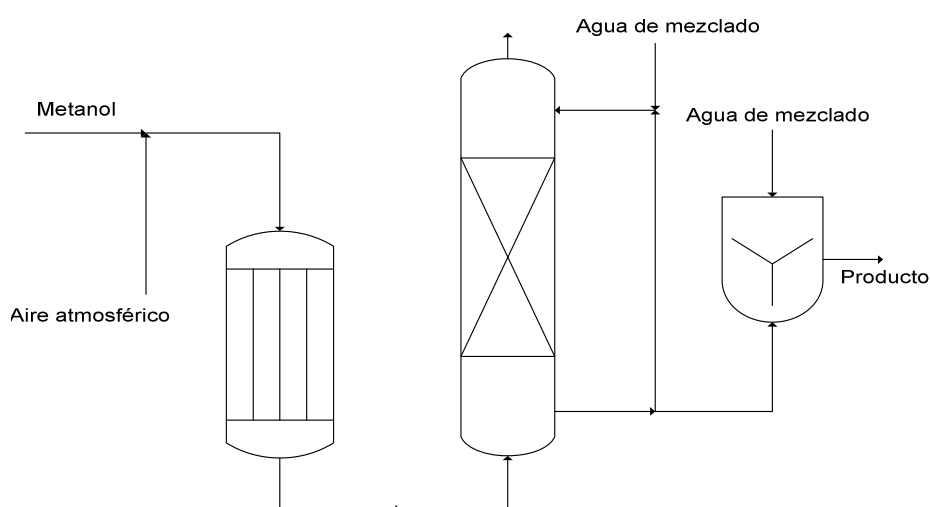
La planta está formada por las dos líneas de proceso anteriormente citadas: la línea de proceso de obtención de metanol a partir de gas natural (explicada en el Proyecto Fin de Carrera “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural**”) y la línea de proceso encargada de la transformación del metanol a formaldehído (explicada en el presente Proyecto Fin de Carrera).

Ambas líneas de proceso se encuentran integradas, siendo la línea del presente Proyecto Fin de Carrera la continuación de la línea proyectada en el “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural**”. Así, a partir del metanol suministrado por el anterior Proyecto Fin de Carrera, se obtiene en formaldehído, que es tanto el producto del presente Proyecto Fin de Carrera como el producto principal de toda la planta en su conjunto.

En las siguientes figuras se puede observar el esquema básico de ambas líneas (no se han incluido los equipos auxiliares, ni equipos de impulsión de fluidos ni intercambiadores de calor).



**Figura 1.1. Proceso simplificado de obtención de metanol a partir de gas natural**



**Figura 1.2. Proceso simplificado de obtención de formaldehído a partir de metanol**

El proceso comienza con la línea de proceso explicada en el Proyecto Fin de Carrera “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural**”. El proceso se inicia con el suministro de gas natural que es mezclado con vapor de agua, y dicha mezcla se comprime y se calienta hasta unas condiciones adecuadas para que dichas sustancias reaccionen formando gas de síntesis ( $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ ). Para dicha reacción, al ser endotérmica, se necesita un aporte de calor continuo, por lo que existe un generador de gases calientes (alimentado con gas natural) que envía dichos gases a la carcasa del reactor para su calefacción. Dichos gases se producen al llevarse a cabo la combustión del gas natural con el aire atmosférico.

En dicho reactor circula por la carcasa los gases calientes, y por los tubos reacciona la mezcla de agua y gas natural. Los gases producidos en la combustión, después de ser acondicionados, se emiten a la atmósfera.

Posteriormente al paso de la mezcla por el reactor, se produce una recirculación parcial de dicha corriente, y la mayor parte de ella se enfría y acondiciona para llegar a un absorbedor.



La reacción del agua y el gas natural, además de no ser completa, posee una reacción paralela no deseada, siendo el producto de esta reacción el  $\text{CO}_2$  y el hidrógeno. Debido a que el  $\text{CO}_2$  es perjudicial para procesos posteriores, se debe eliminar. Para ello se usa una columna de absorción donde la corriente de salida del reactor se pondrá en contracorriente con una corriente de agua con sosa. Dicha corriente líquida será la responsable de la captación del  $\text{CO}_2$ .

Posteriormente, la corriente gaseosa pasa por una membrana donde se dividirá el CO y el  $\text{H}_2$ . Ambas corrientes se enviarán a depósitos esféricos donde se almacenarán, comercializándose parte del hidrógeno almacenado debido a que se encuentra en exceso con respecto al CO para la consecución de la siguiente reacción.

Las corrientes de CO e  $\text{H}_2$  se mezclan en una determinada proporción y se acondicionan para entrar en un reactor donde se producirá la conversión de ambos en metanol. Dicha corriente de metanol se enfriará y se pasará por un condensador donde el metanol condensará saliendo como líquido del proceso, y la parte gaseosa de la corriente será recirculada otra vez al reactor.

El metanol se almacenará en depósitos, y parte se comercializará, pero otra parte será enviada al segundo proceso, donde se obtendrá el formaldehído.

A partir de aquí comienza el proceso diseñado en el presente Proyecto Fin de Carrera “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol**”. Así, ese metanol que se destina a la producción de formaldehído se mezcla con el aire atmosférico y se calentará para alimentar un reactor donde el metanol y el oxígeno del aire reaccionarán obteniéndose formaldehído. Dicha corriente de salida del reactor se enfriará y se mandará a un absorbedor.

El formaldehído es un gas a temperatura ambiente, pero en contacto con el agua reacciona formando metilenglicol, que es un compuesto muy soluble en agua. Por ello se usa la columna de absorción, donde la corriente gaseosa de salida del reactor se pone en contacto en contracorriente con una corriente líquida formada por agua y formaldehído disuelto. Dicha corriente líquida será la responsable de captar el formaldehído gaseoso. La corriente gaseosa de salida del absorbedor será enviada a antorcha.

Después de haber sido captado el formaldehído por la corriente líquida, dicha corriente se enfría (la reacción entre agua y formaldehído es exotérmica) y se recircula parcialmente al absorbedor. Esa corriente que se va a recircular, se mezcla con agua fresca previamente a su entrada al absorbedor.

La parte de la corriente no recirculada se enviará a un mezclador con agitación, donde se le adicionará agua a la disolución para alcanzar la concentración deseada de formaldehído en agua. Finalmente, la mezcla de agua y formaldehído se envía a unos depósitos de almacenamiento para su posterior distribución y venta.

El proceso diseñado en el presente Proyecto Fin de Carrera será explicado con mucho mayor detalle durante todos los documentos de los que consta.

## 1.2. Interacciones entre ambos procesos

Al estar ambos procesos citados anteriormente integrados en una misma planta química, surgen una serie de interacciones entre ellos.

La primera interacción que surge es que la materia prima del proceso en estudio (metanol) es suministrada por el proceso antecedente. Por tanto, las características del metanol son tanto aptas para su venta como para la producción de formaldehído. En el presente Proyecto Fin de Carrera se considera el metanol como materia prima, pero hay que recordar que en la planta en su conjunto el metanol es un producto (parte del metanol producido en el proceso estudiado en el Proyecto Fin de Carrera **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”** se vende, y la otra parte se destina a la producción de formaldehído en el proceso en estudio en el presente PFC).

Otra interacción existente es que en una refrigeración posterior a la reacción de generación de gas de síntesis (perteneciente al Proyecto Fin de Carrera **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”**) se produce un vapor, que es enviado como calefacción a un intercambiador de calor que se encuentra previamente al reactor de producción de formaldehído (perteneciente al Proyecto Fin de Carrera **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol”**). Este vapor, después de haber realizado su labor de calefacción en dicho intercambiador, retorna, para diferentes aplicaciones, al proceso de partida (correspondiente al **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”**).

Por tanto este vapor se transferido de un proceso a otro para la aplicación de diferentes funciones, por lo que las características de dicho vapor (caudal, temperatura, presión, etc.) se conservan al transportarse de un proceso a otro.

Al estar integrados ambos procesos en una planta química, existen características y cuestiones que son comunes a ambos procesos.

Entre ellas se encuentra la localización de la planta. Así, al realizarse la elección de la ubicación de la planta se han tenido en cuenta cuestiones referentes a ambos procesos (materias primas, productos, riesgos y seguridad, logística y comunicaciones, etc.). Por ello, como ejemplo, se puede observar en el **Capítulo 3** de la presente **Memoria Descriptiva**, se tiene en cuenta el transporte de hidrógeno como asunto crucial a tener en cuenta (siendo el hidrógeno un producto del proceso estudiado en el **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”**), además del transporte del formaldehído (producto del proceso estudiado en el presente Proyecto Fin de Carrera).

Existen otras cuestiones que han sido estudiadas para la elección de la ubicación de la planta, comunes a ambos procesos y otras particulares de cada uno. Para más información véase el **Capítulo 5** de la presente **Memoria Descriptiva**.

Otra cuestión que es general en la planta es la distribución de equipos, edificios e instalaciones en la planta. Por ello, se ha realizado una distribución de toda la planta en su conjunto, realizando alguna apreciación particular a cada proceso (condiciones debidas a la presencia de productos inflamables y tóxicos). En dicha distribución se han representado, además de las instalaciones comunes, ambos procesos de forma simbólica, pero en el presente Proyecto Fin de Carrera sólo se va a profundizar en la distribución de los equipos que componen el proceso en estudio.

Para observar dicha distribución, tanto la de la planta en conjunto como la del proceso en estudio, véase el **Capítulo 6** de la presente **Memoria Descriptiva**.

Además, existen instalaciones que son comunes a la planta (suministro y tratamiento de aguas, suministro y transformación eléctrica, gestión de residuos, etc.). Estas instalaciones se construirán con la capacidad suficiente para soportar los requisitos que les impongan ambos procesos en conjunto. La construcción y el diseño de dichas instalaciones no es el objeto del presente Proyecto Fin de Carrera.

Además de todo ello, existen cuestiones que son generales a toda la planta como son los requisitos legales y la normativa, fundamentos teóricos del mantenimiento, seguridad y medio ambiente, etc.

### **1.3. Características de la planta**

En este apartado se expondrán las características generales de la planta.

La planta en estudio se encontrará localizada en el municipio de San Roque, provincia de Cádiz, estando enfocada la producción a la fabricación de formaldehído al 37% en agua, aunque se comercializarán como productos intermedios hidrógeno y metanol. La materia prima empleada es el gas natural proveniente de los gaseoductos que existen por la zona.

La planta en estudio funcionará durante 330 días al año, 24 horas cada uno de dichos días. Por tanto, el periodo de parada se prolongará durante un mes aproximadamente (30 días y 5 días para puesta en marcha).

Debido al horario de la planta habrá puestos de trabajo que estarán divididos en turnos, así existirán para dichos puestos tres turnos distintos (mañana, tarde y noche) de 8 horas laborables diarias cada uno. En cambio, existirán otros puestos de trabajo, debido a la necesidad de presencia en la planta en todo momento, que serán de un solo turno en horario partido o continuo de 8 horas diarias (el modelo de horario de dichos puestos será escogido por la Dirección de la planta).



En los puestos de trabajo que están por turnos se encuentran los operarios de proceso y producción, los operarios de mantenimiento, los técnicos de control y el médico de la empresa, además de los encargados de los turnos (habrá 4, uno por turno y uno de reserva).

En cuanto a los puestos de trabajo con un turno diario se encuentran los puestos directivos (Dirección general, gerente, jefe/a de producción, jefe/a de personal, jefe/a de mantenimiento, jefe/a de ingeniería y diseño, jefe/a de control, y jefe/a de calidad y medio ambiente), los técnicos de seguridad (2 técnicos superiores en prevención de riesgos laborales y 2 de rango intermedio que formarán el servicio de prevención propio), los operarios de administración, ingeniería, compras, almacén, calidad-medio ambiente, laboratorios y secretarios/as.

El resto de puestos de trabajo serán adquiridos mediante subcontratas, becarios y alumnos en prácticas y otros métodos. Entre los puestos de trabajo que ocuparán dichos contratas ajenas a la empresa se encuentran los encargados de limpieza de los edificios, transportistas, seguridad de la planta, operarios de proceso y producción, personal contra incendios, personal contratado para el periodo de parada y puesta en marcha, etc.

En cuanto a los puestos para becas y prácticas en empresas se ofertarán dependiendo de la necesidad en las siguientes áreas: laboratorios, seguridad, compras y gerencia, control, calidad-medio ambiente, administración, ingeniería, y proceso.

En total existirán 100 puestos de trabajo fijos en la planta, llegando a 150 trabajadores contando con los puestos ocupados por subcontratas y personal de prácticas y becarios. En periodo de parada dicha cifra de puestos puede alcanzar los 200 trabajadores.

La planta buscará la acreditación por la serie de normas ISO 9000 (Calidad) y 14000 (Medio Ambiente), y cumplirá todos los requisitos legales de la Ley 31/95 de Prevención de Riesgos Laborales. Para ello poseerá las necesarias medidas de seguridad (contra incendios y contra fugas debido a las inflamabilidad y toxicidad de algunas sustancias químicas usadas), de higiene industrial, ergonómicas y psicosociales, y de vigilancia de la salud; medidas de calidad del producto y servicios, y de gestión de la producción; medidas de evaluación de impacto ambiental y las medidas de disminución de dicho impacto, medidas de gestión de residuos, de vigilancia del entorno natural, etc.

Por último, al comercializarse tres productos distintos (hidrógeno, metanol y formaldehído), la planta es muy versátil, pudiéndose adaptar fácilmente a las necesidades del mercado. Además, los tres productos son muy demandados y tienen muchas aplicaciones, lo que facilita enormemente la labor de venta.

## CAPÍTULO 2: Introducción

La planta diseñada está dedicada a la obtención de formaldehído a partir de gas natural, por lo que es una industria derivada del gas natural. Existen otros productos intermedios, como son el hidrógeno y el metanol, de los que se hablará extensamente en **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”**. En el presente Proyecto Fin de Carrera, en cambio, se centrará en el formaldehído, que es el producto principal y final.

En la actualidad el uso de combustibles fósiles está totalmente extendido por el planeta, siendo las sustancias más importantes empleadas en la industria química (y en otra serie de industrias y aplicaciones).

A lo largo de la historia se han ido usando diferentes tipos de combustibles: primero fue la madera, después fue el carbón, para, en el siglo XIX empezar a usar petróleo, y ya en el siglo XX y XXI el uso del gas natural se extendió.

La principal razón del cambio de un combustible a otro son, principalmente, la capacidad calorífica del combustible (el gas natural posee más poder calorífico que el petróleo, y éste a su vez más que el carbón y la madera). Pero existen otras razones muy importantes que han hecho que varíe el uso de los combustibles, como son el respeto al Medio Ambiente, la disponibilidad, la facilidad de almacenamiento y transporte, consideraciones técnicas, políticas, etc.

Así, uno de los combustibles más usados en la actualidad es el gas natural, ya no sólo por poseer el mayor índice de poder calorífico, sino por ser el más respetuoso con el Medio Ambiente, por estar más distribuido que el petróleo por el mundo y por la cantidad de reservas (aunque es menos abundante y está menos distribuido por el planeta que el carbón), y por la facilidad de transporte (en gaseoductos o en barcos metaneros).

A pesar de todo ello, se sigue usando el petróleo y el carbón extensamente debido a razones de distribución y almacenamiento (el petróleo se usa en los vehículos debido a la dificultad de almacenamiento del gas natural, además de por razones históricas, de frecuencia de repostaje, volumen necesario para almacenar el gas natural, etc.) y por razones logísticas (el carbón se usa en China de forma abundante debido a ser uno de los mayores productores de carbón, así logra autoabastecerse, aunque genera multitud de gases contaminantes que se vierten a la atmósfera).

El gas natural se forma por procesos microbianos de degradación de la materia orgánica a altas presiones y temperaturas. El gas natural se encuentra en depósitos junto con petróleo o de forma aislada. Por ello, cuando comenzó la búsqueda del petróleo, al existir en dichos depósitos gas natural, como no se sabía qué hacer con ese gas, se desechaba.

Desde esa época hasta la actualidad, la industria ha visto la gran cantidad de aplicaciones en las que se puede emplear el gas natural además de su uso como combustible; de ahí aparecen todas las industrias químicas derivadas del gas natural (si bien no existe un nombre comúnmente aceptado para estas industrias como ocurre con las industrias petroquímicas).

Del gas natural se pueden obtener casi los mismos productos que con la industria del petróleo (mediante reformado o craqueo), pero gran parte de ellos se obtienen con mayor dificultad a partir de gas natural que a partir de petróleo, por lo que en estos casos se usa el crudo para producir estos productos.

En cambio existen otros productos en los que la obtención a partir de petróleo es dificultosa, siendo el proceso y la producción a partir de gas natural mucho más sencilla, por lo que se opta por el gas natural en este caso.

El proceso en estudio es uno de estos procesos en los que es más sencillo el uso de gas natural, además de que posee otras ventajas ya citadas como son el respeto al Medio Ambiente, la menor cantidad de impurezas y sustancias que son inertes o venenos para los catalizadores, el buen suministro de éste mediante gaseoductos, etc.

## 2.1. Gas natural y su industria

El gas natural está compuesto básicamente por metano, etano, propano y nitrógeno en diferentes proporciones dependiendo del origen de éste. A pesar de ello, el metano suele ser siempre superior al 85% de la corriente. Además de estas sustancias, existen impurezas de azufre, CO<sub>2</sub>, agua, hidrocarburos pesados, etc. que hacen necesaria su eliminación previa a su transporte y su distribución.

**Tabla 2.1.**  
Composición típica del gas natural

Componente	Análisis típico de gas natural purificado (% molar)	Rango en gas natural purificado (% molar)	Análisis típico antes de purificar (% molar)
Metano	94.9	87.0 - 96.0	70-90
Etano	2.5	1.8 - 5.1	0-20
Propano	0.2	0.1 - 1.5	
iso – Butano	0.03	0.01 - 0.3	
n – Butano	0.03	0.01 - 0.3	
iso – Pentano	0.01	trazas - 0.14	
n – Pentano	0.01	trazas - 0.04	
Hexano y superiores	0.01	trazas - 0.06	
Nitrógeno	1.6	1.3 - 5.6	
CO <sub>2</sub>	0.7	0.1 - 1.0	0-8
O <sub>2</sub>	0.02	0.01 - 0.1	0-0.2
H <sub>2</sub>	trazas	trazas - 0.02	0.02
SH <sub>2</sub>	0	0	0-5

Así, el primer proceso al que se lleva a cabo con el gas natural posteriormente a su extracción es la eliminación de condensados y restos del petróleo mediante sistemas LTX (“Low Temperature Separator”) o mediante una separación sencilla por despresurización.

Posteriormente se elimina el azufre y el CO<sub>2</sub> mediante tratamiento con aminas, y después se elimina el agua mediante deshidratación con glicoles o por deshidratación con sólidos desecantes.

Finalmente se eliminan los líquidos del gas natural por absorción o absorción criogénica. Ya listo el gas natural para su transporte o distribución, se presuriza y se le adiciona mercaptanos. Los mercaptanos son compuestos de azufre con un olor característico que se le añaden al gas natural debido a que este carece de olor. Así, en caso de fugas o escapes, es fácilmente detectable dicha avería, evitando así males mayores. Dichos mercaptanos se eliminan antes de entrar en la planta.

Entre las industrias que usan gas natural para la obtención de diferentes sustancias se pueden nombrar la fabricación de acetileno, etileno, hidrógeno, metanol, ácido acético, formaldehído, urea, dimetiléter, amoníaco, etc.

## **2.2. Aplicaciones del formaldehído**

El formaldehído en sí mismo no tiene aplicaciones, excepto la de conservante de tejidos (en medicina se usa ampliamente, aunque sólo se usa un 1% del formaldehído producido mundialmente para dicho propósito). En cambio, posee muchas aplicaciones en cuanto a elaboración de otros productos que sí son útiles.

Así, el formaldehído que se obtiene en la planta puede ser usado en multitud de aplicaciones, como son la obtención de resinas, adhesivos, desinfectantes, fertilizantes, jabones y detergentes, vacunas, medicinas, etc. y por industrias, en la industria textil y del cuero, farmacéutica, cosmética, maderera, papelera, del corcho, de fertilizantes, eléctrica y electrónica, etc.

La principal aplicación del formaldehído es la obtención de resinas que se usan ampliamente en la industria papelera, del corcho, maderera y de adhesivos. Dichas resinas tienen como uso principal el ser aglutinantes de partículas o porciones de material (es decir, actúan como adhesivos). Así aglutinan las cadenas de celulosa para la formación de papel, las partículas de madera para formar conglomerados, las láminas de madera para formar laminados y trozos de corcho para obtener corchos de diferentes formas y volúmenes.

Las resinas son polímeros termoestables (son duros y rígidos, pero no se pueden volver a moldear usando un aumento de la temperatura) que se producen por la reacción directa del formaldehído con otra sustancia. Las resinas se nombran a partir de las sustancias de las que parten; así los tres tipos básicos de resinas son las resinas urea-formol, las resinas fenol-formol y las resinas melanina-formol.

- **Resinas urea-formol:** estas resinas se suelen usar como elementos de moldeo, siendo la aplicación principal la destinada a la industria maderera (para la obtención de madera terciada). Además se usa en la industria eléctrica y electrónica.
- **Resinas fenol-formol:** estas resinas también se suelen usar como elementos de moldeo, siendo la aplicación principal la destinada a la industria maderera (para la obtención de madera laminada). También se suele usar en la industria papelera y del corcho.
- **Resinas melanina-formol:** estas resinas se suelen usar también como elementos de moldeo, pero su distribución es menor que las dos anteriores.

El empleo de dichas resinas presenta numerosas ventajas:

- Se usa unos componentes que antes se desechaban (virutas de madera), aumentando así la rentabilidad de las empresas madereras.
- Además, al aprovechar dichos componentes, se reducen los efectos ambientales (no se llevan a vertedero, sino que se reutilizan, que es uno de las principales medidas de conservación del Medio Ambiente).
- Se reduce el precio de la madera y derivados (mobiliario, accesorios del hogar, parquet y similares, etc.) para la gente de a pie, provocando un aumento de las ventas y del comercio.
- La calidad de la madera se unifica y se refuerza (maderas blandas como el abedul, el chopo, etc. se pueden usar ahora perfectamente debido a que las resinas, además de actuar como aglutinantes, aumentan la resistencia mecánica).
- Al aprovechar las virutas, la cantidad de árboles a talar se reduce para obtener la misma cantidad de objetos de madera (las maderas macizas se suelen comercializar más caras que las maderas laminadas o conglomeradas. Existen muchos muebles que usan solo un tipo de madera, pero gran parte del mobiliario combina ambas maderas. Así la parte a la vista suele ser de madera maciza, y la parte oculta (mecanismos de abertura de mesas plegables, armazón de camas, etc.) es de conglomerado y laminado al poseer prácticamente las mismas propiedades y ser más barato).

Además de la obtención de resinas, otra aplicación importante del formaldehído es como desinfectante, bactericida y fungicida. Debido a esta característica se usa ampliamente como desinfectante en diferentes campos, como son en la sanidad (mascarillas, guantes, etc.), en actividades agrícolas y ganaderas, en la industria textil (en la fabricación de ropa interior), etc. Para esta finalidad se puede usar puro (aunque no es lo más habitual) o mediante sustancias derivadas de éste.

Además de estas aplicaciones se usa en vacunas (de la difteria, de la poliomielitis y de la gripe), en la industria textil para la obtención de ropa que no se arruga, en la obtención de placas de rayos X, en la obtención de papel fotográfico, en la fabricación de fertilizantes, como conservante de la madera y el cuero, en la obtención de plásticos para la industria electrónica y para la industria automovilística, en la industria de moneda y timbre para la obtención de billetes, etc.

### 2.3. Comercio del formaldehído y empresas

La producción y el comercio del formaldehído en el mundo han ido variando conforme el paso del tiempo. Así, en 1998, los mayores productores eran Europa (32%), Estados Unidos (30%) y Japón (8%), mientras que en la actualidad el mayor productor mundial es China, seguida de Europa y EEUU.

Según estudios recientes, a principio de 2006 existían en China 300 industrias productoras de formaldehído con una capacidad total de 11 millones de toneladas al año y un consumo de 6-7 millones de toneladas. Se ha observado que en el año 2009 China ha tenido una sobreproducción de formaldehído, exportándose todo el producto sobrante a distintos países.

En cuanto a EEUU, sobre el 75% del formaldehído producido se destina a la producción de resinas para maderas laminadas y conglomeradas. En EEUU en el año 2000 el formaldehído era el compuesto químico número 26 en volumen de producción (Wittcoff et al., 2002). Existían en EEUU 40 plantas que producían formaldehído, y 11 en Canadá en 2006. Alrededor de dos terceras partes de los productos de madera manufacturados en EEUU se exportan a otros países.

El crecimiento del mercado en EEUU se predijo que sería del 1% al año hasta 2010 de acuerdo con ICB Americas (el estudio es de 2007), creciendo la demanda en los EEUU de 4,76 millones de toneladas en 2006 a 4,96 millones de toneladas en 2010.

En la siguiente tabla se puede observar la producción de formaldehído en el año 2003 (véase como había aumentado la producción del año 2003 al 2006 (el dato anteriormente citado de 4,76 millones de toneladas)):

**Tabla 2.2.**

Producción en el año 2003 en EEUU de formaldehído (Global Insight, Marzo 2006)

Sustancia	Cantidad (Millones de T <sub>m</sub> )	Aplicaciones Principales
Dicloruro de etileno	9952	PVC
MTBE	7375	Aditivo de gasolinas
Etilbenceno	5575	Obtención de estireno
Estireno	5239	Poliestireno
<b>Formaldehído</b>	<b>4325</b>	<b>Resinas termoeestables y otros productos químicos</b>

Las transacciones económicas que se mueven en torno al formaldehído en EEUU, los trabajos que generan las industrias que lo fabrican y otros términos económicos se pueden observar en la siguiente tabla:



**Tabla 2.3.**

Parámetros económicos en el año 2003 en EEUU generados por la producción de formaldehído  
(Global Insight, Marzo 2006)

Sustancia	Unidades	Industria del formaldehído	Economía de EEUU	Tanto por ciento del total
Ventas	10 <sup>9</sup> \$/año	127,3	11000	1,2 %
Empleos totales	10 <sup>6</sup> trabajadores	3,6	108	3,3 %
Salarios totales	10 <sup>9</sup> \$/año	112,1	6300	1,8 %
Inversión en capital fijo	10 <sup>9</sup> \$	77,4	1832	4,2 %

En la siguiente tabla se pueden observar los principales destinos del formaldehído producido y el dinero generado en dichas actividades en el año 2003 en EEUU:

**Tabla 2.4.**

Destinos y beneficios de la producción de formaldehído en EEUU en el año 2003 (Global Insight, Marzo 2006)

Uso final del formaldehído	Valor económico en 2003 (10 <sup>9</sup> \$/año)
Resinas urea-formaldehído (UF)	3,41
Resinas fenol-formaldehído (PF)	4,64
Resina poliacetal	0,22
1,4-Butenodiol (BDO)	0,14
MDI	2,33
Pentaeritritol	0,14
Control de Ventas de Fertilizantes	0,11
Resinas melanina-formaldehído (MF)	0,37
Otros productos y derivados	5,85
<b>Beneficios totales</b>	<b>17,22</b>

Como se puede observar en la tabla anterior, la mayor parte de la producción de formaldehído se destina a las resinas de urea-formol y fenol-formol, y otros compuestos importantes son las resinas MDI (resinas muy novedosas que se usan en la industria automovilística) y las resinas melanina-formol.

En cuanto a Europa, al ser un mercado maduro, los crecimientos son bajos (un 2% al año), pero en zonas del Este de Europa los crecimientos son del 5% y en Rusia del 7% al ser mercados recientes.

Las principales empresas productoras de formaldehído en el mundo son:

- Hexion, multinacional que posee varias plantas en el mundo (en Europa posee una fábrica en Rotterdam, Países Bajos, y tiene otras fábricas en Australia, Latinoamérica, Asia y Norteamérica).
- Borden, EEUU

- DuPont, EEUU
- Perstorp, Suiza
- Hoechst Celanese, EEUU
- Georgia Pacific, EEUU
- Degussa, Alemania

Hexion, por ejemplo, anunció en 2006 que sus ventas de formaldehído aumentaron un 17% sobre las del año 2005.

Hablando ya sobre España, en todo el territorio español no existe ninguna gran empresa o industria que produzca grandes cantidades de formaldehído. Esto es así porque o bien las empresas que existen son muy pequeñas (por lo que su producción de formaldehído es baja) o el formaldehído que producen lo obtienen como producto intermedio.

Aproximadamente la cuarta parte del formaldehído necesario en España es suministrado por las empresas del territorio español, pero las otras tres cuartas partes deben ser importadas. Aún así, parte del formaldehído producido se exporta, pero su cantidad es muy pequeña.

El total de importaciones en España en el año 2009 ascendió a 214365 T<sub>m</sub> (la planta diseñada, al poseer una producción de 22000 T<sub>m</sub> aliviaría aproximadamente un 10% de dicha deuda), con un coste de 190.704 millones de €

En la siguiente tabla se pueden observar las importaciones de formaldehído de España en el año 2009 de los mayores países exportadores:

**Tabla 2.5.**

Importaciones en España en el año 2009 de formaldehído de los mayores países exportadores  
(Agencia Tributaria)

País	Peso (T <sub>m</sub> )	Valor (miles de €)	Nº Operaciones
Alemania	8334,9	27.717.112	1378586
Argelia	12666,5	3.446.936	2298
EEUU	7169,9	7.861.180	455765
Francia	18410,8	23.055.000	1098323
Italia	10191,8	13.595.258	952207
Nigeria	7933,5	2.572.501	1400
Portugal	7952,7	6.547.827	300
Rusia	14775,3	4.224.644	8502

Como se puede observar los grandes países exportadores de formaldehído a España son los países de alrededor (Portugal, Francia, Argelia, Italia) y los grandes países productores (Alemania, EEUU y Rusia, la cual está aumentando mucho su producción de formaldehído gracias a la gran cantidad de gas natural que posee en su territorio).

La existencia de Nigeria en dicha tabla se puede razonar que es porque el formaldehído que se produce allí es mucho más barato que el de los países cercanos (si no, véase como la cantidad

importada es muy parecida a la importada de Portugal o de Alemania, y el precio de dichas importaciones es mucho menor). Por ello, puede ser que en dichas importaciones de Nigeria premiara el precio del formaldehído de compra que la cercanía del país, la producción total del país o la calidad del producto.

Los siguientes países que aparecen en la lista, pero que no se han presentado en la **Tabla 1.4.**, serían China (el mayor productor del mundo, pero está muy alejado de España), Brasil (ocurre una situación similar a China) y Libia, Arabia Saudí e Irán (que producen mucho formaldehído debido a las grandes reservas de gas natural que poseen).

Por último, debido a todas las razones anteriores, tanto por la no existencia en España de plantas dedicadas a la fabricación de formaldehído como porque si se instalara la planta la cantidad importada sería de un 10% menor, hace que la concepción y diseño de la planta sea novedoso y que la construcción de ella, a priori, sea factible.

Entre las empresas que usan el formaldehído para sus diferentes aplicaciones se pueden nombrar: “IKEA”, “Victoria’s Secret”, “Dynea”, “L’Oreal”, “Panreac”, “Titan”, “Bruguer”, “Carrefour” y “Sfera”.

#### **2.4. Perspectivas de futuro**

Como se dijo anteriormente, el crecimiento del mercado del formaldehído es bueno, por lo que se puede esperar buenas condiciones futuras de mercado. Pero dichos informes son de periodos anteriores a la actual crisis existente, por ello se hace necesario una perspectiva de futuro distinta a la de dichos informes (los organismos internacionales y nacionales todavía están analizando las estadísticas de los años 2007 y 2008, años en los que empezó a surgir la crisis, por lo que no se disponen en la actualidad datos e informes que den datos fiables de datos económicos, de crecimiento y producción).

Por tanto, a continuación, se hará un pequeño análisis de la situación futura del mercado del formaldehído. Dicho análisis puede ser que se cumpla o no, pero las consideraciones que se tomarán son ciertas.

Como cualquier actividad, la crisis afecta negativamente a la industria del formaldehído debido a múltiples razones que no se expondrán aquí, pero que pueden hacer que la situación de las empresas de fabricación de formaldehído sea muy delicada.

La bajada del consumo afecta al mercado de mobiliario y grandes productos del hogar, lo que puede generar en una menor demanda de las empresas madereras de formaldehído para fabricar maderas laminadas y conglomeradas.

Pero, a pesar de ello, al ser dicho tipo de maderas mucho más baratas que las macizas, y por lo tanto, los muebles también son más baratos, las personas de a pie, ante una necesidad, preferirán elegir un mueble o complemento más barato (es decir, de madera conglomerada o laminada). Puede ser que dicha conducta de los consumidores haga que o la bajada de

demanda de formaldehído por la industria maderera no sea tan baja, o que dicha demanda se mantenga estable o aumente (el comportamiento de la demanda no se puede predecir con exactitud, sino que es posible que ocurra alguna de dichas modificaciones).

Por ello, posiblemente, las condiciones para la industria del formaldehído no sean tan pesimistas como para otro tipo de industrias durante la crisis.

Por último, hay que tener en cuenta que, a pesar de los recortes presupuestarios y ajustes que se producen actualmente con la crisis, poco a poco se irá saliendo de dicha crisis, por lo que hay que tener una previsión de futuro y augurar el crecimiento de la industria del formaldehído cuando la crisis haya terminado.

## **CAPÍTULO 3: Objeto del proyecto**

El objeto del presente Proyecto Fin de Carrera es el diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol que se encuentra englobado en una planta química que estará compuesta por dicho proceso y otro cuyo fin es obtener el metanol para alimentar al proceso en estudio en el presente Proyecto Fin de Carrera.

El formaldehído obtenido posee una pureza del 37% en peso en agua, poseerá impurezas de metanol que permite su estabilidad, y la producción de dicho producto será de 22.000 T<sub>m</sub>/año. El proceso hará uso del proceso de obtención de formaldehído a partir de catalizadores de óxidos metálicos, y posteriormente dicho producto se acondicionará y almacenará para su venta.

El presente Proyecto Fin de Carrera tiene como objetivo el diseño de la línea de producción anteriormente citada, estando excluidos los siguientes cálculos del objeto de este Proyecto:

- Conducciones auxiliares.
- Suministro y red eléctrica de la planta.
- Almacenamiento, tratamiento del agua de la planta, y la red de distribución de ésta.
- Cimentación de los equipos.
- Diseño de los edificios e instalaciones anejos a la línea de proceso en estudio.
- Aspectos de diseño mecánico en detalle (los cálculos realizados son a nivel global).

## **CAPÍTULO 4: Viabilidad del proyecto**

En este apartado de la Memoria del presente Proyecto Fin de Carrera se presentará la viabilidad desde tres puntos de vista: viabilidad técnica, viabilidad económica y viabilidad legal.

### **4.1. Viabilidad técnica**

El tipo de proceso que se va a usar en la planta se decide básicamente escogiendo el tipo de catalizador que se va a usar. Así, dependiendo de qué clase de catalizador se use, la planta poseerá una estructura u otra.

#### **4.1.1. Proceso y alternativas al proceso**

Como se dijo anteriormente, dependiendo del catalizador la estructura de la planta cambia. Así, existen dos tipos básicos de planta:

1. Plantas en las que se usan catalizadores de plata en la reacción
2. Plantas en las que se usan catalizadores de óxidos metálicos en la reacción

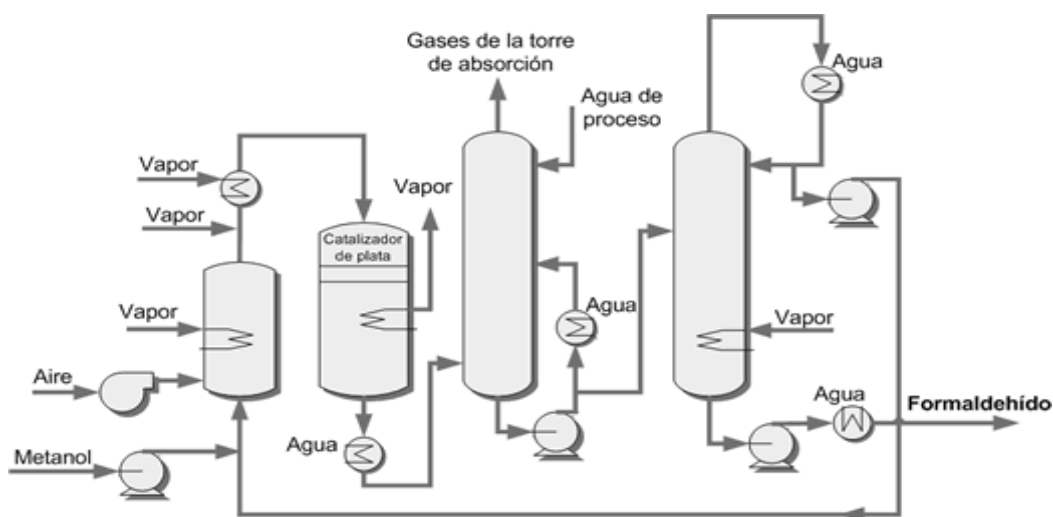
La primera de ellas es el primer tipo de planta industrial para la obtención de formaldehído que se empleó, siendo la segunda el tipo de planta que se ha desarrollado más recientemente. Debido a que las plantas basadas en catalizadores de plata son más complejas y necesitan más equipos, las nuevas plantas que se construyen para la producción de formaldehído son plantas basadas en catalizadores de óxidos metálicos. A pesar de ello, las plantas basadas en catalizadores de plata son más versátiles que sus homónimas, pero no suele ser motivo suficiente para que las empresas apuesten por la construcción de este tipo de plantas.

Aún así, aproximadamente el 30% de la plantas de producción de formaldehído siguen basándose en catalizadores de plata, siendo el restante porcentaje las plantas basadas en catalizadores de óxidos metálicos.

Se verá ahora el esquema general de cada una de esas plantas.

##### **4.1.1.1. Planta basada en catalizadores de plata**

El esquema básico de las plantas basadas en catalizadores de plata se puede observar a continuación:

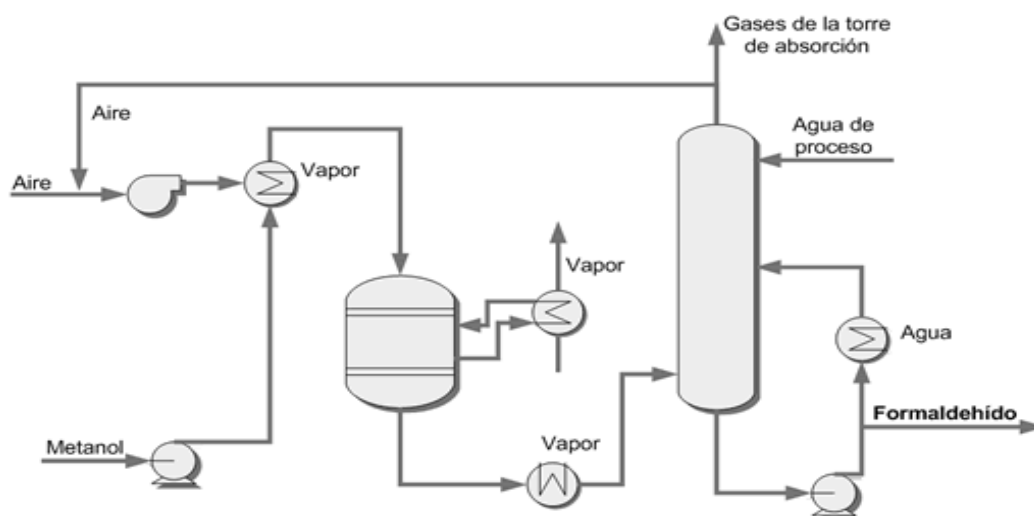


**Fig. 4.1.** Esquema del proceso de obtención de formaldehído por catalizadores de plata

En el diagrama del proceso se observa cómo se mezcla la corriente de metanol con aire atmosférico y se aprovecha para vaporizar la mezcla resultante mediante un intercambio de calor con vapor de agua. Toda la mezcla, ya en estado gaseoso, entra en el reactor donde se encuentra contenido el catalizador de plata, y es allí donde se produce la reacción con un rendimiento no demasiado alto. Ya obtenido el formaldehído, se absorbe éste y el metanol remanente en un absorbedor con agua de proceso. Como el porcentaje de metanol es demasiado elevado debido a la baja conversión del reactor, se lleva la corriente resultante del absorbedor a una torre de destilación donde se obtiene por colas el formaldehído con las condiciones esperadas. El metanol que sale por cabeza de columna se recircula al mezclador que se encuentra antes del reactor para minimizar pérdidas de reactivo.

#### 4.1.1.2. Planta basada en catalizadores de óxidos metálicos

El esquema básico de una planta de formación de formaldehído basada en catalizadores de óxidos metálicos es:



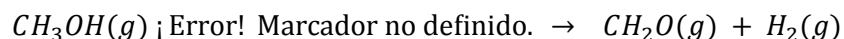
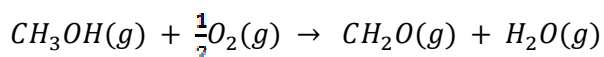
**Fig. 4.2.** Esquema del proceso de obtención de formaldehído por catalizadores de óxidos metálicos



En el diagrama se puede observar como la corriente de metanol es mezclada con aire y vaporizada, y luego entra al reactor (en el esquema se puede observar como es un reactor de doble lecho, aunque se puede usar otros tipos de reactores) donde se encuentra el catalizador. Después de haberse producido la reacción, la cual posee un alto rendimiento de reacción (98-99%, o incluso más), la corriente se lleva a una torre de absorción donde el formaldehído y el metanol son absorbidos por el agua de proceso que se introduce en la torre (el agua que se introduce en la torre se puede mezclar con el formaldehído de recirculación también). Los gases de salida del absorbedor, al ser en este caso casi en su totalidad oxígeno y nitrógeno, se llevan a antorcha, aunque es posible (si se desea) que una parte de estos gases se recircule al mezclador inicial.

#### 4.1.2. Comparativa de ambas plantas

En el reactor basado en catalizadores de plata se producen las reacciones:



La segunda reacción no se suele producir en los reactores basados en catalizadores de óxidos metálicos, por lo que los reactores basados en catalizadores de plata son más versátiles que lo anteriormente citados. En cambio el rendimiento de la reacción en los reactores basados en catalizadores de plata es inferior a la que se obtiene al usar catalizadores de óxidos metálicos (en este tipo de plantas es normal conseguir rendimientos del 98% y del 99%), por lo que se necesitan más operaciones de separación posteriores en las plantas basadas en catalizadores de plata (fíjese que las plantas basadas en catalizadores de óxidos metálicos no poseen la torre de destilación, mientras que en el otro tipo de plantas es imprescindible esta instalación). Además la selectividad de los catalizadores de plata es mucho menor a la de los catalizadores basados en óxidos metálicos.

Otro problema que tiene la planta basada en catalizadores de plata es que el gas que sale del absorbedor debe obligatoriamente llevarse a antorcha porque posee cantidades superiores de formaldehído a las que la ley permite que se emitan a la atmósfera. Mediante el otro tipo de planta esto no ocurre (los gases son prácticamente en su totalidad nitrógeno y oxígeno), aunque los gases de salida del absorbedor se suelen llevar a antorcha también para prevenir efectos adversos en la salud y el medio ambiente.

Otra cuestión es que el catalizador de plata posee una vida útil menor que los catalizadores de óxidos metálicos (3-8 meses frente a 12-24 meses del otro tipo de catalizador) aunque ambas clases de catalizadores se pueden regenerar fácilmente.

La presión en ambos procesos es la misma (presión atmosférica), pero la temperatura a la que opera el reactor basado en catalizadores de plata es de 600-650 °C, superior a la que se emplea para el reactor del proceso basado en catalizadores de óxidos metálicos (270-330 °C), por lo que se debe emplear más energía y recursos para obtener estas temperaturas y los

materiales a usar en el reactor deberán ser más resistentes a la temperatura y corrosión (por lo tanto, más caros) en las plantas basadas en catalizadores de plata que en las plantas basadas en catalizadores de óxidos metálicos.

Las plantas basadas en los catalizadores de plata fueron las primeras plantas que se construyeron para este propósito (a principios del siglo XX), apareciendo las plantas basadas en óxidos metálicos en los años 50 (aunque fueron investigadas en profundidad para posterior uso en los años 30 del pasado siglo).

Debido a toda la serie de ventajas explicadas (mayor rendimiento de reacción, planta más barata, sencilla y con menores requerimientos energéticos, no necesidad de quemar los gases de salida del absorbedor (aunque sea recomendable), mayor vida útil de catalizador y condiciones de operación menos severas) nos lleva a elegir como planta a diseñar la instalación basada en catalizadores de óxidos metálicos. Además, conociendo que las plantas que se están construyendo en la actualidad son de este tipo, nos reafirmamos más si cabe al escoger este tipo de instalación.

#### **4.1.3. Desviaciones frente al proceso general**

En este pequeño apartado se explicará la elección del proceso comparándolo con el esquema general. El proceso es muy similar al de la **Figura 3.2.** del presente Capítulo, pero posee algunas pequeñas modificaciones:

- **El reactor usado será multitubular:** la elección de un reactor multitubular en vez de un reactor multilecho se puede observar en el **Apartado 11.1.** del **Capítulo 11** de la presente **Memoria Descriptiva**.
- **El vapor que se produce al refrigerar el reactor se usará directamente para diferentes aplicaciones.**
- **La corriente gaseosa de salida del absorbedor se llevará íntegramente a antorcha:** debido a que la cantidad de formaldehído es muy pequeña (a nivel de trazas) en esa corriente, y que dicha corriente posee menor proporción de oxígeno que el aire atmosférico, se prefiere llevarla a antorcha para su posterior combustión. Esto se debe a la toxicidad del formaldehído y sus efectos nocivos sobre el Medio Ambiente, por lo que se prefiere proceder a la combustión de dicha corriente para prevenir efectos en la salud de los trabajadores y el entorno (aunque el CO<sub>2</sub> producido en la combustión es nocivo para el Medio Ambiente, no lo es tanto como el formaldehído). Gracias a esta medida, además, se evitan los equipos innecesarios (recirculaciones, soplantes, accesorios, etc.), aunque se pierde una mínima cantidad de rendimiento al no recircularla (este rendimiento que se aumentaría es casi despreciable, menor al 0,01%).
- **La recirculación de producto al absorbedor se realizará por la parte superior de la columna, y dicha corriente irá mezclada con agua:** la corriente de salida líquida del absorbedor se recirculará parcialmente a éste, pero se mezclará con agua líquida antes

de entrar al absorbedor. Esta operación se realiza porque la concentración de formaldehído en agua de la corriente de salida líquida del absorbedor es bastante elevada pudiéndose llegar, si no se produjese esta mezcla, a que la mezcla quedara saturada. Por ello se le agregará a esta corriente de recirculación agua pura. Además se introducirá toda esta mezcla en la parte superior de la columna para aprovechar todo el volumen para el contacto de las fases y así recoger todo el formaldehído posible (por tanto, la corriente de agua que entra en la parte superior del absorbedor en la **Figura 4.2.** no existe en nuestro proceso).

- **Se poseerá un mezclador al final del proceso para ajustar la concentración de formaldehído en el agua.**

Las desviaciones frente al proceso teórico que se han comentado anteriormente, las cuales van a aplicar en la planta en estudio, son desviaciones comunes en la industria del formaldehído. Es decir, muchas plantas de producción de formaldehído aplican estas desviaciones, y otras que en el proceso no se realizan por no ser convenientes, por diferentes motivos (dependen de múltiples características, como la pureza del catalizador, temperatura de reacción escogida, cantidad de formaldehído en los gases de salida del absorbedor, etc.).

#### **4.2. Viabilidad económica**

La línea de producción de formaldehído diseñada en la al Proyecto Fin de Carrera “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol**” posee unos costes y beneficios.

De acuerdo con el **Capítulo 5** del documento **E. Presupuesto**, la rentabilidad del presente proceso en estudio es superior al 15%, por lo que su viabilidad económica está completamente justificada.

Para realizar un correcto análisis de los costes, se deben tener en cuenta las siguientes partidas:

- Costes de Fabricación

Se incluyen en este punto los costes relacionados con:

- Materias Primas. Presupuesto parcial correspondiente al gas natural y los catalizadores.
- Mano de obra directa.
- Mano de obra indirecta.
- Servicios generales. Incluye el agua de refrigeración, el vapor de alta, y la electricidad consumida por las unidades de compresión y bombeo.
- Honorarios de proyecto y dirección de montaje.

- Costes de Gestión

Se consideran en este concepto los costes Comerciales.

- Costes relacionados con la tecnología aplicada

Se consideran en este apartado los costes correspondientes al inmovilizado de las unidades de proceso, es decir, los costes derivados de la adquisición de equipos, instrumentación, tuberías y aislamiento.

Los beneficios generados por la planta proceden de la comercialización del formaldehído al 37%.

#### 4.3. Viabilidad legal

La viabilidad legal viene determinada por la legislación y normativa que el proyecto debe cumplir, tanto a nivel del producto, como a nivel del proceso.

El presente Proyecto cumple todas las normativas vigentes que se relacionan con los aspectos que se desarrollan en el mismo. Además, no existe ninguna legislación que impida la ejecución y operación del presente Proyecto.

La legislación aplicable en el presente Proyecto Fin de Carrera es:

- **Ley 31/1995**, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- **Real Decreto 1299/2006**, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro. BOE núm. 302 de 19 de diciembre.
- **Real Decreto 1244/1979**, de 4 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Aparatos a Presión.
- **Real Decreto 1942/1993**, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones de Protección contra Incendios.
- **Real Decreto 2267/2004**, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad contra Incendios en Establecimientos Industriales.
- **Real Decreto 400/1996**, de 1 de marzo. Aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.
- **Real Decreto 485/1997**, de 14 de abril. Disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- **Real Decreto 773/1997**, de 30 de mayo. Disposiciones mínimas sobre utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.
- **Real Decreto 1254/1999**, de 16 de julio, por el que se aprueban las medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes.
- **Real Decreto 379/2001**, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de productos Químicos y sus instrucciones técnicas complementarias.

- **Real Decreto 614/2001**, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la seguridad y salud de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.
- **Real Decreto de 842/2002**, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.
- **Decreto 3151/68**, de 28 de noviembre, reglamento de la Línea de Alta tensión.
- **Real Decreto 681/2003**, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.
- **Reglamento (CE) 1907/2006** del Parlamento Europeo y el Consejo, de 18 de diciembre, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).
- **Real Decreto 286/2006**, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.
- **Real Decreto 374/2001**, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.
- **Real Decreto 1124/2000**, de 16 de Junio, por el que se modifica el Real Decreto 665/1992, de 12 de Mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo (B.O.E. núm. 145 de 17 de Junio de 2000).

La normativa que se ha seguido en el diseño de la línea de proceso ha sido:

- **Código ASME** de diseño, Sección VIII-Div.1 y Div.2.
- Catálogo de **Normas UNE**.
- **Normas ANSI**.
- **Normas ISO**.
- **Norma API 650**. Diseño y cálculo de tanques de almacenamiento a presión atmosférica.

## **CAPÍTULO 5: Localización de la planta**

La localización se realizará de la planta en su conjunto, ya que la línea de producción en estudio se encuentra incluida en ésta.

La ubicación de una planta industrial se realiza teniendo en cuenta múltiples factores, como son la cercanía de empresas que puedan comprar el producto o de las que se pueda abastecer la materia prima, la dificultad de transporte de dichas sustancias, puntos geográficos de especial relevancia, nudos de comunicaciones, poblaciones cercanas, economía de la región, etc.

En este Capítulo se explicará, de forma razonada, la elección de la localización de la planta exponiendo las características de dicha región y explicando las industrias cercanas proveedoras de materias primas y destinatarias de los productos.

### **5.1. Elección de la localización**

La planta en estudio posee como productos principales el hidrógeno, el metanol y el formaldehído.

El formaldehído es el producto principal, por lo que la planta deberá ubicarse en una zona donde existan industrias que puedan usar dicho producto. En la provincia de Cádiz no existen grandes empresas de papel, cartón ni madera, pero existe una actividad productiva que puede emplear el formaldehído producido: la industria del corcho.

El corcho es la corteza secada de algunos árboles, entre ellos uno muy común en esta zona como es el alcornoque. La obtención del corcho es una actividad no destructiva, es decir, no se necesita talar el árbol ni le produce a éste ningún daño irremediable, sino que el árbol regenera esta corteza de forma natural al cabo de un tiempo.

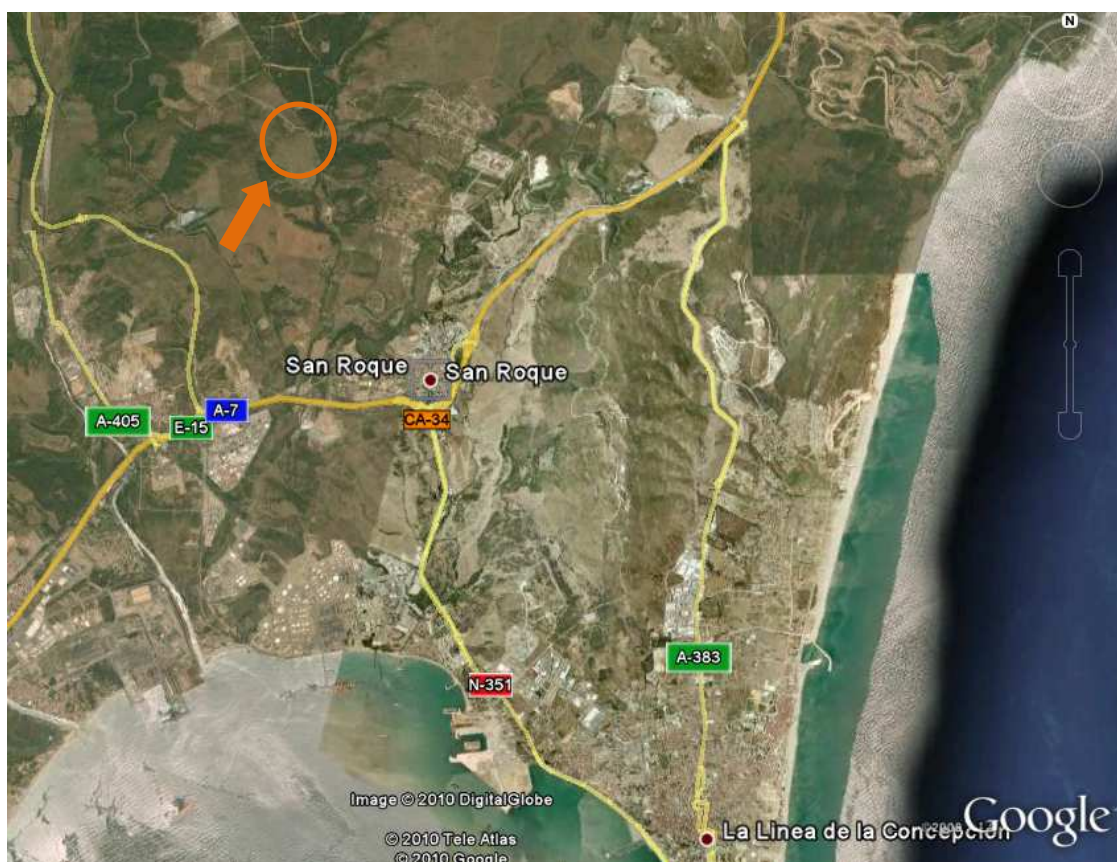
En la provincia de Cádiz existe una comarca donde la industria del corcho está muy extendida, siendo esta región la contenida y limítrofe con el Parque Natural de los Alcornocales. Debido a que varias empresas e industrias del corcho se localizan en dicha región, la planta diseñada debe estar en las proximidades de dicha zona.

El hidrógeno es un gas con una temperatura de ebullición muy baja y es muy inflamable, por lo que no se recomienda su transporte a largas distancias por seguridad. Con respecto al metanol y al formaldehído al 37% en agua, al estar en estado líquido, aunque son inflamables y tóxicos, no poseen grandes inconvenientes a su transporte (comparándolo con el hidrógeno). Por ello, la planta puede ubicarse un poco más alejada de la región de Los Alcornocales si es necesario, si con ello la distancia de transporte de hidrógeno a su destino es menor.

En dichos alrededores existen varias plantas que hacen uso de hidrógeno en sus procesos, escogiéndose como destinataria del hidrógeno producido en la planta la **Refinería CEPSA Gibraltar-San Roque**. Por ello, la planta diseñada deberá estar próxima a dicha industria.

Además, la materia prima más importante en la planta es el gas natural, y como es un gas inflamable, la planta deberá estar cerca de las instalaciones de alimentación de dicho gas natural. Debido a que el gas natural, en dicha comarca, se puede obtener mediante conexión autorizada a un gaseoducto, se opta porque la planta esté en las proximidades de un tramo de gaseoducto.

Por ello, la planta deberá estar cerca de la **Refinería CEPSA Gibraltar-San Roque**, en las proximidades a un gaseoducto y no lejos de la zona de Los Alcornocales. Por ello se escoge la siguiente ubicación de la planta:



**Figura 5.1.** Localización de la planta

Se ha escogido esta región por cinco razones básicas:

- La distancia entre la **Refinería CEPSA Gibraltar-San Roque** y la planta diseñada es pequeña (menor a 5 km) por lo que el hidrógeno se puede transportar a la refinería mediante camiones (al ser la distancia pequeña los gastos serán menores y los riesgos asociados al transporte, aunque los mismos, se verán reducidos por el periodo menor de exposición del hidrógeno a las condiciones severas a las que se somete para su transporte) o, incluso, mediante tuberías que lo lleven directamente a su destino.



- La distancia entre la planta y el gaseoducto es pequeña. En toda la comarca del Campo de Gibraltar, debido a su posición estratégica, existen varios gaseoductos que circulan por su territorio. Por ello, escoger la planta en dicha región es beneficioso debido a los menores gastos en el transporte del gas natural del gaseoducto a la planta.



**Figura 5.2.** Esquema de la red de gaseoductos de Andalucía (La Guía de la Energía)

- La zona escogida está, dentro de la comarca, cerca de las industrias del corcho. El Parque Natural de los Alcornocales se encuentra al norte de la región mostrada en la **Figura 2.1.**, por lo que cuanto más al norte esté la planta, menor recogido deberá sufrir el formaldehído final para llegar a su destino (conllevando menos gastos y mayor seguridad). Por ello, se ha escogido una zona que esté al norte de la refinería.
- La localización elegida está cerca de carreteras principales, haciendo que la planta sea accesible con facilidad (la planta se encuentra a menos de 3 km de una carretera principal). No es conveniente que una planta química esté demasiado cercana a una carretera principal porque, en caso de accidente grave, puede que los efectos adversos (fuego, fuga de compuesto tóxico, etc.) se dirijan a la carretera principal, por donde circula gran cantidad de vehículos, provocando riesgos a gran cantidad de población. La planta poseerá una carretera propia que conectará a la red principal de carreteras.
- La zona escogida está alejada lo suficiente de núcleos de población. Esta causa es una de las más importantes en cuanto a la elección de la localización. La comarca del Campo de Gibraltar es una región bastante densamente poblada, además existen grandes núcleos urbanos cercanos unos a otros. Una planta química, al igual que se comentó anteriormente con las carreteras principales, nunca debe estar demasiado cerca de núcleos de población debido a que cualquier accidente grave en la planta podría tener efecto en las poblaciones cercanas aumentando el número de lesiones, daños, etc. Por ello, la planta se ha colocado lo más lejos posible de las poblaciones, siendo la distancia al núcleo de población más cercano mayor a 2,5 km (distancia que creemos conveniente para prevenir riesgos).

Por tanto, debido a todas estas causas, la planta se ha decidido que se ubique en dicha zona, la cual está a menos de 5 km al norte de la **Refinería CEPSA Gibraltar-San Roque**, a menos de 3 km de una carretera principal, en las cercanías de un gaseoducto y a más de 2,5 km de cualquier

núcleo de población. La planta estará al norte de dicha región, además de por las anteriores razones logísticas y de seguridad, para situarse más próxima a las industrias del corcho.

## 5.2. Ventajas de la zona escogida

La localización de la planta en la región anteriormente citada tiene una serie de ventajas adicionales que se comentarán a continuación.

- Las comunicaciones en la comarca del Campo de Gibraltar son muy buenas, existiendo varias autovías y carreteras que conectan con puntos clave de la geografía. Así existe una autovía que conecta con Jerez de la Frontera, y de este nudo de transporte se derivan diferentes autovías que llevan a diferentes destinos (Sevilla-Madrid, Sanlúcar, etc.). Además existen una autovía y autopista a Málaga, y una futura autovía (todavía en construcción) a Cádiz. Toda esta red de carreteras permite que el transporte de las materias primas, equipos, productos, etc. sea muy sencillo y que fácilmente los camiones puedan fácilmente llegar a la planta sin complicaciones.

Además de esto, su cercanía al mar, y sobre todo al estar la comarca próxima al estrecho de Gibraltar (lugar de gran tránsito de barcos) hace que, si el transporte por carretera es inviable, muy caro o no deseado por razones de seguridad, se pueda optar fácilmente por el transporte por mar. El puerto de Algeciras es uno de los más grandes de España y uno de los de mayor tránsito de mercancías, por lo que es totalmente factible dicho transporte marítimo de los equipos o sustancias necesarias.

Por último, existen materias primas que provienen de otros países (por ejemplo el catalizador de molibdato de hierro (III) que se compra de Suiza) por lo que toda esta red de transporte y las diferentes posibilidades de transporte facilita sobremanera la llegada y envío de equipos y sustancias. Además, la facilidad de transporte también permite que en algún caso (si se cree necesario) se pueda intentar la comercialización del producto ya no sólo en dicha comarca, sino en otros sitios de España más alejados, e incluso, pensar en exportar a otros países.

- El terreno del que dispone la planta a su alrededor es extenso, lo que posibilita que, ante necesidades de la planta, se puedan realizar ampliaciones de ésta en terrenos anexos mediante su compra previa. Además, como el formaldehído no se suele usar como tal, sino que la mayor parte se convierte en resinas, existe la posibilidad de la instalación de una planta de elaboración de resinas de formaldehído que se ubique anexa a la planta en estudio.
- El clima imperante en la zona es bastante benévolo, denominándose a este ambiente clima mediterráneo. Este clima está caracterizado por inviernos suaves y veranos calurosos, y precipitaciones no muy elevadas. Por ello, no existen grandes inconvenientes climáticos en la ubicación de la planta, excepto por una magnitud: el viento.

La comarca del Campo de Gibraltar es una región donde combate mucho el viento (sobre todo el viento de levante) por lo que se tomarán las precauciones necesarias para evitar accidentes tanto en la instalación como en la operación en la planta debido a este fenómeno.

- En toda la comarca existen múltiples industrias, situándose muchas plantas químicas de diferente índole. Es una comarca muy industrializada, lo que conlleva una serie de ventajas como son la colaboración entre plantas en materia de seguridad, la menor distancia de transporte entre plantas (para enviar o recoger mercancías), etc.

Los productos que se generan en la planta se pueden enviar a varias industrias de la zona debido a su versatilidad: así, aunque se ha escogido como destinataria del hidrógeno la **Refinería CEPSA Gibraltar-San Roque**, éste se podría enviar a otras industrias de la zona. Lo mismo ocurre con el metanol (que se envía a la planta de **Abengoa** para formar MTBE) y con el formaldehído (que se iba a distribuir entre varias empresas de la zona, aunque si existe un exceso de producción, parte de dicha producción se podría destinar a laboratorios y hospitales de la zona).

Otra ventaja es que en la provincia de Cádiz existen varias empresas que se encargan de la gestión de los residuos, por lo que el coste de transporte será menor, y la comunicación y el seguimiento del proceso con esta empresa será más fluida (personal de la planta podrá visitar la empresa en caso de que falle o falte algo, etc.).

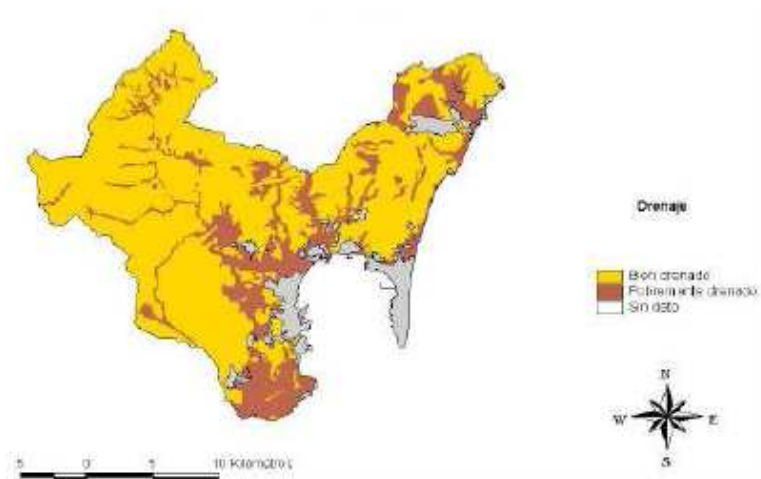
- Es una comarca densamente y altamente poblada, existiendo una oferta de servicios muy alta y muy bien comunicados, Así existe una extraordinaria red de agua, una red eléctrica bien organizada (nótese que en la comarca, concretamente en Los Barrios, existe una Central Térmica), gaseoductos, oleoductos, etc. Todo ello facilita enormemente el transporte de agua, electricidad y materias primas a la planta.

### 5.3. Características de la zona

En el presente apartado se expondrán, de manera concisa, las características más importantes de la región.

- ✓ **Temperatura:** la temperatura media en la zona es de 18,2 °C, la cual es idónea para la actividad industrial. Existen muchas horas de sol al día, lo que posibilita la instalación de placas solares para autoabastecer a la planta.
- ✓ **Precipitaciones:** las precipitaciones en la región no son elevadas. El valor medio son 759,9 milímetros (Instituto Nacional de Estadística).
- ✓ **Vientos:** los vientos predominantes en la comarca son el viento de levante (viento cálido del este, algo húmedo y que actúa de forma inconstante). La velocidad máxima alcanzada por el viento en la región es de 180 km/h, pero no suele superar habitualmente velocidades mayores a 50 km/h.

- ✓ **Suelo:** el tipo de suelo de la región es el correspondiente a las Sierras y Colinas del Campo de Gibraltar, el cual se caracteriza por una textura arcillo-limosa, y se encuentran formados por arcillas y margas finas. Son suelos profundos, estructura compacta en el perfil pero irregular en su superficie, casi impermeable (permite poco el drenaje), calizos de pH alcalino y con un contenido de materia orgánica bastante aceptable.



**Figura 2.3.** Drenaje del terreno en la comarca del Campo de Gibraltar (Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología)

- ✓ **Empresas de los alrededores:** existen multitud de empresas en los alrededores pero las más importantes para la planta son la **Refinería CEPSA Gibraltar-San Roque**, la planta de **Abengoa**, las empresas del corcho de la zona y las empresas de gestión de residuos (se ha optado por la empresa Delta S.A. ubicada en la ciudad de Cádiz).
- ✓ **Electricidad:** la electricidad está garantizada por estar instalada en la zona una central térmica (Central Térmica de Los Barrios).
- ✓ **Agua:** el agua está garantizada, además de por la red de tuberías de la comarca, por prospecciones de pozos para sacar agua en caso de necesidad. Al agua de alimentación se le realizarán los tratamientos pertinentes para poder operar con ella.
- ✓ **Líneas de transporte:** la zona está muy bien comunicada. Está la carretera A-381 que se dirige a Jerez de la Frontera, y la A-7 que se dirige a Barcelona. En cuanto al transporte marítimo, se encuentra en las proximidades el puerto de Algeciras, uno de los puertos más grandes y con mayor tránsito de navíos de España.
- ✓ **Gas Natural:** el gas natural necesario en la planta se obtendrá de un gasoducto que se encuentra cercano a la planta. El precio del gas natural depende del consumo de éste:

**Tabla 5.1.**

Tarifas de gas natural en la red nacional de gaseoductos (La Guía de la Energía)

TARIFA DE CONSUMO		TÉRMINO FIJO (€/cliente)/mes)	TÉRMINO FIJO (€/kWh./día)	TÉRMINO VARIABLE (€/kWh.)
<b>Tarifas grupo 2 (4 bar &lt; P ≤ 60 bar)</b>				
2.1	Consumo inferior o igual a 500.000 kWh/año	141,06	0,039121	0,021586
2.2	Consumo superior a 500.000 kWh/año e inferior o igual a 5.000.000 kWh/año	141,06	0,039121	0,021574
2.3	Consumo superior a 5.000.000 kWh/año e inferior o igual a 30.000.000 kWh/año		0,050298	0,021346
2.4	Consumo superior a 30.000.000 kWh/año e inferior o igual a 100.000.000 kWh/año		0,047504	0,021248
<b>Tarifas grupo 3 (P ≤ 4 bar)</b>				
3.1	Consumo inferior o igual a 5.000 kWh/año	2,44		0,049489
3.2	Consumo superior a 5.000 kWh/año e inferior o igual a 50.000 kWh/año	5,46		0,042247
3.3	Consumo superior a 50.000 kWh/año e inferior o igual a 100.000 kWh/año	42,31		0,033402
3.4	Consumo superior a 100.000 kWh/año	63,13		0,030905
<b>Tarifas grupo 2 bis (P ≤ 4 bar)</b>				
2.1	Consumo inferior o igual a 500.000 kWh/año	146,17	0,040539	0,022414
2.2	Consumo superior a 500.000 kWh/año e inferior o igual a 5.000.000 kWh/año	149,3	0,041406	0,022907
2.3	Consumo superior a 5.000.000 kWh/año e inferior o igual a 30.000.000 kWh/año		0,053634	0,022844
2.4	Consumo superior a 30.000.000 kWh/año e inferior o igual a 100.000.000 kWh/año		0,051256	0,023025

## CAPÍTULO 6: Distribución del proceso

En el presente Capítulo se abordará la distribución de la planta en su conjunto, para posteriormente realizar la distribución del proceso en estudio.

### 6.1. Distribución en planta

El esquema básico de distribución en planta se puede ver a continuación (nótese que no es un plano, es un esquema de cómo se encuentra la planta distribuida, sin distancias, ni escalas):

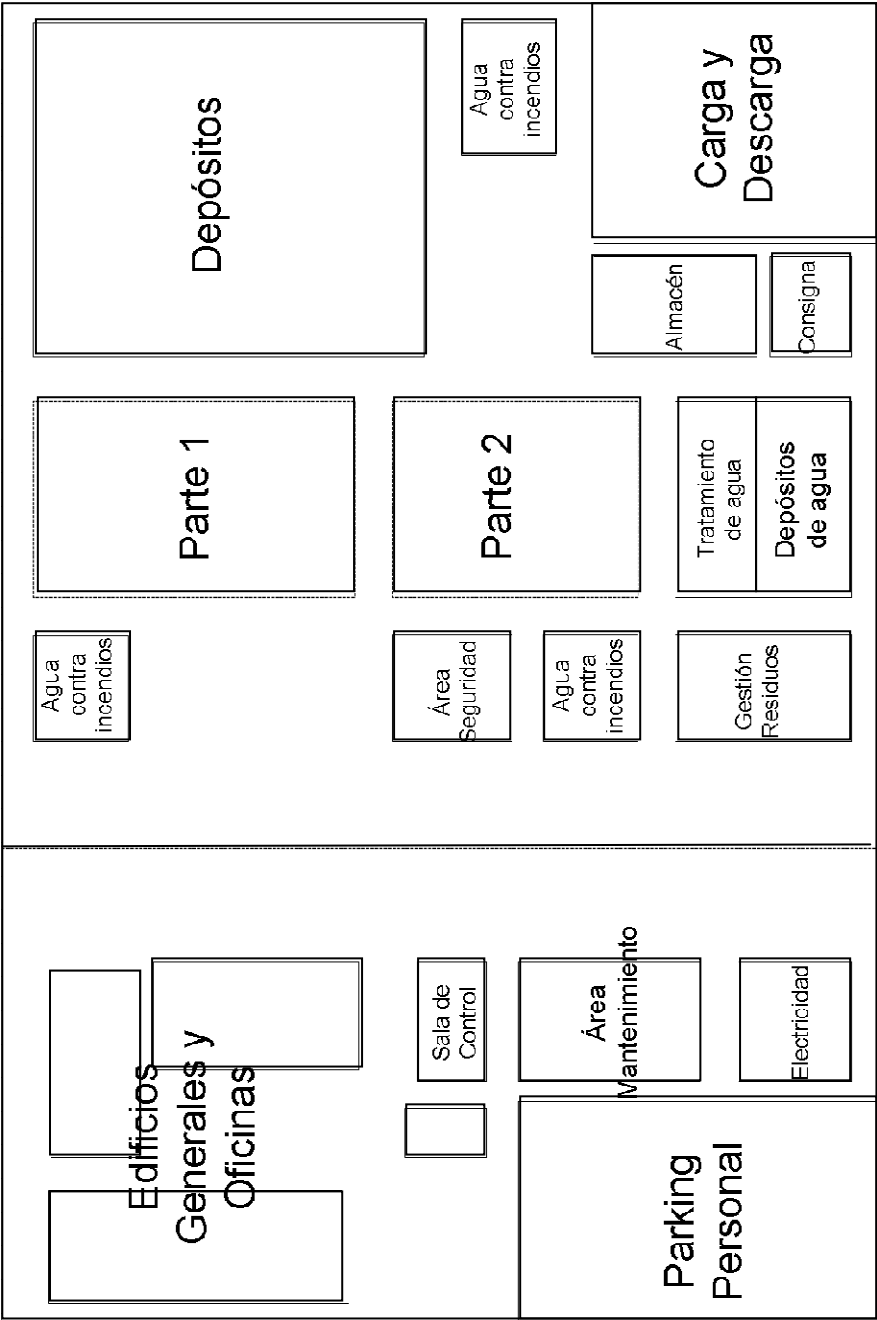


Figura 6.1. Esquema general de la distribución de la planta

Las instalaciones con las que cuenta la planta son:

- **Edificios generales y oficinas:** estos edificios son donde se encuentran las oficinas, las áreas comunes (cafetería, recepción, etc.) y los laboratorios. Entre las oficinas estarán las de dirección, gerencia y contabilidad, medio ambiente, seguridad, diseño, etc.
- **Sala de control:** desde aquí se controlará la operación en la planta mediante ordenadores y otros dispositivos gracias al personal de control.
- **Área de mantenimiento:** en esta área se encuentran tanto las oficinas de mantenimiento como el almacén de piezas comunes para reparaciones, equipos para los análisis del mantenimiento preventivo, etc.
- **Área de electricidad:** en esta área estarán todas las instalaciones para la transformación, adecuación y conducción de la corriente eléctrica al resto de la planta. Esta zona debe estar alejada de las áreas donde se trabaje con compuestos inflamables y de la zona de agua.
- **Agua contra incendios:** en estas instalaciones se encuentran los equipos para la lucha contra incendios (bocas de riego, depósitos de agua contra incendio, etc.). Estas áreas se deben encontrar cerca de las zonas con compuestos inflamables o explosivos.
- **Área de seguridad:** en esta área se encontrarán distintas instalaciones, como el almacén de EPIs, una habitación habilitada con medicinas y primeros auxilios por si ocurre algún accidente y duchas en caso de contaminación. Esta área debe estar cerca de la zona de trabajo en planta debido a deber pasar todo el personal por ahí bastante a menudo para recoger o dejar EPIs, y debido a que si ocurre algún accidente la atención al herido sea rápida.
- **Gestión de residuos:** en esta zona se encontrarán los almacenes de residuos y alguna operación de adecuación de éstos para su traslado o tratamiento posterior. Así, se encontrarán almacenes de catalizadores usados, depósitos de aceites lubricantes usados, tratamientos de estos aceites para su posterior traslado a plantas de gestión de residuos, etc.
- **Tratamiento y depósitos de agua:** en esta área se encontrarán los depósitos de agua, y ésta posteriormente se tratará para poder introducirla en diferentes equipos de proceso. Aquí se encontrarán equipos para el tratamiento como filtros, ósmosis inversa para eliminación de sales, etc.



- **Almacén:** esta área es la encargada de almacenar grandes equipos o material que proviene del área de carga y descarga. Así, las grandes piezas de reparación, los equipos nuevos y los catalizadores preparados para su inserción en los reactores se almacenarán aquí previamente a su colocación.
- **Consigna:** este edificio albergará las oficinas en las cuales se expedirán los certificados para permitir la entrada y salida de camiones en la planta, y para que los camiones recojan producto ya vendido para transportarlo a su destino, o descarguen la materia prima o equipos que ha adquirido la planta mediante su compra. Toda actividad que haya sido permitida deberá ser incluida en un registro. Esta instalación debe estar muy próxima al parking de carga y descarga.
- **Área de carga y descarga:** esta zona es un parking donde los camiones estacionarán para esperar a que le expidan el certificado de entrada a la planta, y será también zona de tránsito de camiones. Esta área debe estar cerca de las zonas donde se encuentran los productos (zona de depósitos) y la zona donde se descargan las compras realizadas (almacén).
- **Parking de personal:** esta área es un parking donde el personal de la planta podrá estacionar su vehículo. Deberá estar colocado cerca de los edificios generales y oficinas.
- **Parte 1:** es donde se encuentran los equipos de proceso del Proyecto Fin de Carrera “Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”.
- **Parte 2:** es donde se encuentran los equipos de proceso del Proyecto Fin de Carrera “Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol”.
- **Depósitos:** en esta área se encontrarán los depósitos de materia prima, producto y otras sustancias que intervienen en el proceso. Esta zona, al almacenar grandes cantidades de sustancias, en nuestro caso peligrosas, se situará lo más lejos posible de la zona donde se concentre el personal de la planta (edificios generales y oficinas). Además, debido a ser sustancias inflamables, debe estar alejada de zonas con fuentes de ignición (zona de electricidad).

Después de haber explicado en qué consisten cada una de las instalaciones de planta, se procederá a explicar la distribución escogida.

Como se puede observar existen dos zonas claramente separadas: la primera comprende el parking de personal, la sala de control, los edificios generales, el área de mantenimiento y el

área de electricidad. La segunda comprende el resto de zonas (área de seguridad, zona de aguas, gestión de residuos, agua contra incendios, Parte 1 y Parte 2, depósitos, consigna, almacén y carga y descarga).

La primera zona se encuentra en un nivel inferior del suelo al que se encuentra la segunda zona, por ello para pasar de una zona a otra se habilitarán tanto rampas, escaleras y cuestas para camiones. Entre cada zona y la línea imaginaria que las divide existe una distancia de seguridad, por lo tanto entre los edificios de una zona a la otra habrá una distancia del doble de esta distancia de seguridad.

La razón de colocar la primera zona a otro nivel de la segunda, y el uso de distancias de seguridad entre ambas partes, se debe a que la segunda zona es el área operativa de planta, es decir, donde se va a encontrar todos los equipos, depósitos, etc. Al ser esta zona en la que se usan los compuestos de la planta (que alguno es bastante tóxico, como el formaldehído) es preferible, por seguridad, mantenerla alejada de la zona donde se va a encontrar gran parte del personal (de oficinas, recepción, laboratorios, dirección, diseño, mantenimiento, etc.). Por ello el uso de esta distancia de seguridad (aunque en la zona operativa también existe personal, éste es menos numeroso y no es posible alejar a este personal de la planta). El uso del nivel es una medida preventiva para en el caso de algún accidente, la zona de oficinas y general esté más protegida.

En la zona general y de oficinas se ha incluido los edificios más generales, los que no poseen equipos de tratamiento ni diseño, y los que no necesitan estar en contacto o cercanos a la zona de operación. Entre ellos se ha incluido el área de electricidad debido a que en toda la planta se usan compuestos muy inflamables, y por ello no se puede ubicar esta instalación en las cercanías de la zona operativa. Por ello se ha intentado colocar lo más lejos posible de dicha zona.

En la zona operativa se han incluido todas las instalaciones con equipos o que deban estar cerca del proceso de la planta. Así se han incluido, además de las zonas de proceso de la planta en sí (Parte 1, Parte 2 y depósitos), la zona de aguas, de gestión de residuos, agua contra incendios, almacén, consigna, carga y descarga y el área de seguridad.

La zona de carga y descarga debe poseer, en alguna parte de su perímetro, una consigna donde se permitirá el tránsito de camiones, y se registrarán las operaciones llevadas a cabo en ellos. Además, las instalaciones donde se descarga la materia prima o se recogen los productos deben estar cercanas y accesibles a ésta. Por ello se ha colocado los depósitos en las proximidades de esta zona, y el almacén donde se almacenarán el catalizador nuevo y el usado, y los equipos nuevos o de desecho.

Alrededor de la Parte 1, Parte 2 y los depósitos se encuentran varias estaciones de agua contra incendios para proceder en caso de fuego. Además, existirá una red que rodea el perímetro de estas zonas con tuberías por las que circula agua contra incendios.

La Parte 1 y la Parte 2 se encuentran separadas 20 metros de la zona de depósitos debido a normas de seguridad. Esta área intermedia será ocupada por un paso para camiones y

personal. Se recuerda que la zona de depósitos posee un cubeto de retención, por lo que se encuentra por debajo del nivel del resto de la zona operativa.

La zona de aguas y de residuos se encuentran cerca de la zona de operación (Parte 1 y Parte 2) debido a evitar costes en el bombeo a larga distancias. La zona de residuos se ha escogido que se encuentre entre la zona de aguas y la zona de oficinas para que las instalaciones de electricidad y las de agua se encuentren lo más lejos posible.

El área de seguridad se encuentra muy cerca de la zona operativa (Parte 1 y Parte 2) por si ocurre algún accidente y para evitar caminatas del personal para obtener algún EPI. Además, esta instalación, se encuentra entre la zona de oficinas y la operativa en sí, por lo que facilita el tránsito del personal (es decir, si el personal comienza su jornada, o por el contrario alguien del personal autorizado de la zona de oficinas necesita ir al área operativa, pasará primero por el área de seguridad donde se colocará el traje de protección, adquirirá los EPIs, y ya equipado, podrá realizar la tarea que necesite).

Entre todas las instalaciones de la zona operativa existirán pasos para personal y camiones. El paso de camiones estará muy regularizado, restringido y controlado debido al uso de compuestos inflamables y ser dichos camiones una fuente de ignición. Por ello, sólo se permitirá el paso de camiones a retirar producto o materias prima y en las paradas de la planta, el paso estará permitido para operaciones de cambio que equipos, recogida de residuos, etc.

El área con más riesgos para la seguridad es el área de los depósitos debido a que se acumulan muchos compuestos químicos nocivos o tóxicos, por ello los edificios generales se encuentran lo más lejos posible de éstos (véase la **Figura 6.1.**).

Además de todo esto, el agua contra incendios de la Parte 1 y la Parte 2 se encuentran cerca de los edificios generales para en caso de algún accidente, que formen una cortina de agua que no permita daños, tanto personales como materiales, en la zona de oficinas.

Además de las zonas anteriormente expuestas, existirá una zona de antorchas que se ubicará fuera de la parcela de la planta y se colocará, preferentemente, en una zona alta (monte o colina).

Por último, las zonas de evacuación en caso de accidente de la planta serán ambos aparcamientos (el de personal y el de carga y descarga), explicándose las razones de qué personal debe salir por cada uno de ellos según se dicte en el Plan de Evacuación de la Planta. Esta elección no vendrá tanto por el tipo de personal o el área en el que trabaje, sino de la zona donde se encuentre en ese momento, de hacia dónde se dirige el fuego o el contaminante, etc.

6.2. Distribución del proceso en estudio

En este apartado de la Memoria del presente Proyecto Fin de Carrera se presentará la distribución de los equipos correspondientes al proceso y se expondrá la distancia mínima entre los equipos.

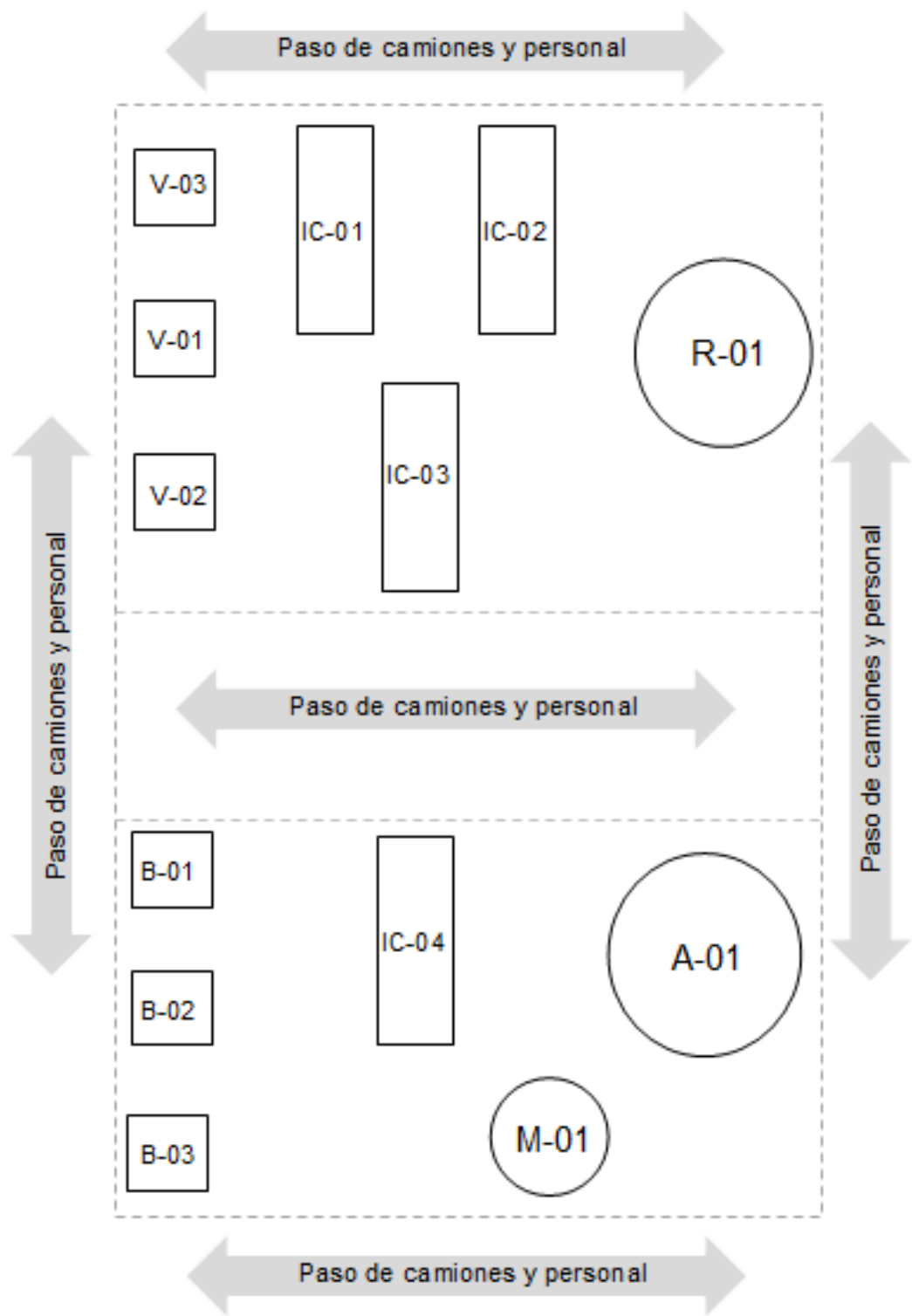


Figura 6.2. Esquema simplificado de distribución del proceso

En la anterior figura se ha mostrado una distribución simplificada del proceso sin las conducciones y sin estar colocados los equipos a las distancias reales mediante ningún tipo de escala, simplemente es un esquema simplificado de cómo se encontrarán los equipos dispuestos entre ellos en la planta. Así, se puede observar, como las bombas se encuentran agrupadas en una zona de la planta, con los ventiladores ocurre lo mismo, etc.

La distribución de una planta real se basa en la agrupación integrada de equipos (es decir, las bombas se encuentran en una zona, que se suele denominar zona de bombeo, lo mismo ocurre con el resto de equipos) para favorecer las labores de mantenimiento y de inspección. A pesar de ello, si existen varios procesos en la planta, generalmente se suele separar estos procesos, y después dentro de éstos los equipos sí se encuentran agrupados.

Siguiendo estas directrices, se ha propuesto la anterior distribución del proceso por encontrarse los equipos similares agrupados (las bombas están agrupadas en la parte inferior izquierda, los ventiladores están agrupados en la parte superior izquierda de la figura, los intercambiadores de calor se encuentran agrupados en la zona central de la figura, y el resto de los equipos, al no poseerse equipos similares a éstos, se ha optado por colocarlos en la parte derecha de la figura).

Además, considerando lo de que las plantas se suelen distribuir por procesos, se han colocado los procesos de recepción de materias primas, adecuación de éstas, reacción y enfriamiento de la corriente de salida del reactor en la zona superior de la figura, debido a que todos estos procesos están encaminados a la obtención de formaldehído en el reactor. Después se ha optado por colocar en la zona inferior de la figura los equipos del proceso de adecuación del producto, estando separados ambos procesos (el de reacción y el de adecuación del producto) por un pasillo por donde podrán pasar tanto el personal como camiones.

Como se puede observar hay pasillos rodeando toda la línea de proceso, como el anteriormente citado pasillo entre los procesos. Estos pasillos posibilitan el acceso del personal a los equipos para labores de mantenimiento, inspección, para la realización de pruebas o para obtener muestras, etc. La existencia de estos pasillos es fundamental ya que permiten que el personal compruebe el buen funcionamiento del equipo, accedan a aislarlo en caso de fallo o por planificación (el uso alternativo de bombas, etc.), la realización de pruebas para comprobar que no existe corrosión, el poder realizar las labores de mantenimiento, etc.

Además de permitir el paso de personal se realizarán estos pasillos con la anchura y altura necesaria para que puedan pasar camiones debido a que éstos suelen ser necesarios (y otro tipo de automóviles como grúas, etc.) para labores de mantenimiento complicadas (como, por ejemplo, sacar el haz de tubos de los intercambiadores de calor), a labores en el periodo de parada, la instalación de un equipo nuevo, etc.

La circulación en estos pasillos estará reglada por un criterio de circulación interno de la planta.

Se expondrá ahora la zona por la que se podrá acceder a los equipos:

- Proceso de adecuación de materias primas y reacción:
  - Ventiladores: se accederá fundamentalmente por el pasillo de la parte izquierda.
  - Intercambiadores IC-01 y IC-02: se accederá por el pasillo de la parte superior.
  - Intercambiador IC-03: se accederá por el pasillo central.
  - Reactor R-01: se accederá, fundamentalmente, por el pasillo derecho.
- Proceso de adecuación:
  - Bombas: se accederá generalmente por el pasillo izquierdo.
  - Intercambiador IC-04: se accederá a él por el pasillo central.
  - Absorbedor A-01: se accederá a él, generalmente, por el pasillo de la parte derecha.
  - Mezclador M-01: se accederá fundamentalmente por el pasillo inferior.

El proceso comentado anteriormente estará conectado mediante tuberías a los depósitos de almacenamiento (para recoger el metanol de alimentación como para almacenar el producto final). Como se comentó en el **Apartado 6.1.** del presente capítulo, los depósitos de almacenamiento se encuentran separados de las zonas de proceso, por lo que no aparecen en la distribución del presente proceso.

Finalmente, se ha escogido colocar el reactor, el mezclador y el absorbedor en la parte derecha en vez de en la parte izquierda o central (que también se podría realizar teóricamente) debido a que son los equipos donde existen más riesgos a la seguridad a causa de reacciones químicas o a almacenar grandes cantidades de compuesto peligroso. Por ello, al igual que ocurría con los depósitos de almacenamiento en el **Apartado 6.1.**, para prevenir daños mayores a las personas en caso de accidente, se colocarán estos equipos lo más lejos posible de los edificios de oficinas, mantenimiento, control, etc. Como estos edificios se encontrarían en la parte izquierda de la **Figura 6.2.**, aunque bastante alejados del proceso (véase la **Figura 6.1.**) se ha optado por colocar dichos equipos (mezclador, reactor y absorbedor) en la parte derecha de la distribución.

### 6.3. Distancias mínimas entre equipos

Ya colocados los equipos del proceso falta conocer la distancia entre ellos. Para dicha tarea se va a usar la siguiente tabla:

**Tabla 6.1.**  
Distancia mínima entre equipos (Especificaciones de Refinería Cepsa ESP-0200-1)

Distancia en metros	Compresores	Reactores y Recipientes	Intercambiadores de calor	Bombas
Compresores	3			
Reactores y Recipientes	9	(*)		
Intercambiadores de calor	9	(*)	1,5	
Bombas	9	3	3	2

(\*): para diámetros inferiores a 3 metros la distancia mínima será de 2,5 metros; para diámetros entre 3 y 5 metros la distancia mínima será de 3 metros; para diámetros mayores a 5 metros la distancia mínima deberá ser de 4 metros.

Usando estos valores se puede conocer las distancias entre los equipos. En el presente Capítulo no se expondrán, pero se podrá observar cómo se han usado en el **Anexo 11** donde se usan para la obtención de la longitud de las conducciones que conectan los equipos.

Por último, después de haber propuesto esta distribución y de calcular la distancia entre los equipos, se calculan las conducciones. Si la distribución que se propone es adecuada, las pérdidas de carga en dichas conducciones no deben ser muy elevadas y se pueden superar con facilidad (es decir, los equipos de impulsión pueden perfectamente vencer esas pérdidas de carga y que lleguen los fluidos al equipo en cuestión con la presión deseada).

En el caso en cuestión, se puede observar que con la distribución propuesta y las distancias mínimas entre los equipos, las pérdidas de carga son pequeñas y pueden ser superadas con facilidad por los equipos de impulsión, por lo que se puede considerar viable la distribución propuesta del proceso (véase el **Anexo 11** para observar los cálculos).

## CAPÍTULO 7: Materias primas y productos

En el presente capítulo se abordará las características de las materias primas y del producto, además de las características del catalizador.

### 7.1. Materias primas

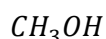
Las materias primas usadas en el proceso son básicamente cuatro: el metanol proveniente del Proyecto Fin de Carrera “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural**”, aire atmosférico, agua y el catalizador del reactor.

#### 7.1.1. Metanol

Como se comentó anteriormente, el metanol de alimentación estará suministrado por el proceso que se diseña en el PFC “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural**”. Por ello, no se pagará por recibir esta materia prima.

La corriente de metanol de alimentación contendrá un 98% en peso del mismo y el 2% restante será hidrógeno disuelto en éste. Se recibirá este metanol en fase líquida a temperatura de 298 K (25°C).

La fórmula química del metanol es la siguiente:



Es el primer alcohol por número de carbonos, es un líquido volátil a temperatura ambiente, y forma una molécula angular (ángulo de 108,9°) polarizada debido a la presencia del oxígeno. Es por esto por lo que es líquido a temperatura ambiente poseyendo un peso molecular parecido al del etano (el etano es un gas a temperatura ambiente).

Es inflamable, incoloro y se suele usar en múltiples aplicaciones: desde reactivo para la obtención de otros compuestos (como es el caso) a aplicaciones como disolvente o más recientemente como combustible (el biometanol).

Se puede obtener por varios procesos, desde por métodos puramente químicos, hasta obtenerlo mediante procesos biológicos o bioquímicos. Las propiedades más importantes de este compuesto se detallan a continuación:



**Tabla 7.1.**

Propiedades del metanol

Temperatura ebullición (K)	338
Temperatura crítica (K)	512,64
Peso molecular (g/mol)	32
Presión crítica (Pa)	$8,14 \cdot 10^6$
Calor latente de vaporización (J/mol)	35200
Densidad a 25 °C (kg/m <sup>3</sup> )	790
Punto de inflamación (K)	288
Temperatura autoignición (K)	658

Véase su ficha de seguridad en el **Anexo 15**.

### 7.1.2. Catalizador

La elección del tipo de catalizador proviene del tipo escogido de planta (explicado en el **Capítulo 3** de la presente **Memoria Descriptiva**), y ya escogido el tipo de planta, se ha elegido un catalizador consistente en partículas esféricas de 3 mm de diámetro cuyo principio activo es el  $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$  o molibdato de hierro (III). Es un sólido blanco-verdoso con las siguientes características:

**Tabla 7.2.**

Propiedades del catalizador

Configuración	Esférica
Diámetro de partícula (mm)	3
Densidad de partícula (kg/m <sup>3</sup> )	1666,67

Véase su ficha de seguridad en el **Anexo 15**.

## 7.2. Servicios generales

Además de las materias primas anteriormente citadas, existen otros elementos que son necesarios en el proceso: agua, aire, electricidad y material de aislamiento.

A continuación se verán con detalle cada uno de ellos.

### 7.2.1. Agua

El agua es un líquido incoloro, inodoro e insípido a temperatura ambiente. Es una de las sustancias más extendidas en el planeta e imprescindible para la vida en el mundo, además de, por sus propiedades y por su abundancia, por ser una de las materias primas más empleadas en la industria.

El agua posee como punto de fusión los 273 K y como punto de ebullición los 373 K, lo que hace que se use en los tres estados de la materia usualmente en la industria (sobre todo en estado vapor y líquida).

En el proceso en estudio el agua poseerá cuatro aplicaciones principales:

- Agua líquida para refrigeración del reactor e intercambiadores de calor.
- Vapor de agua para calentamiento del intercambiador de calor IC-02.
- Reactivo en la absorción del formaldehído.
- Componente de mezcla para la adecuación del producto final (formaldehído).

Otras aplicaciones del agua pueden ser el apagado de incendios, limpieza de equipos, transportes y edificios, agua corriente en duchas, servicios, hostelería, oficinas, etc.

El vapor de agua para la calefacción del intercambiador IC-02, como se comentó en el **Apartado 1.2.** de la presente **Memoria Descriptiva**, proviene del proceso de obtención de metanol, y después de haber realizado su labor de calefacción retorna a dicho proceso.

El agua para el resto de aplicaciones (refrigeración, reactivo en la absorción de formaldehído y componente de mezcla para adecuación del producto) se recoge de la red interna de la planta.

El agua necesaria para el proceso será adquirida de una de estas formas:

- Mediante conexión autorizada a la red de abastecimiento de agua local.
- Mediante recepción de agua de camiones cisterna.
- Mediante extracción a través de pozos.

La elección de la manera de abastecimiento depende de múltiples factores complejos, por lo que se esperará a análisis económicos, políticos y técnicos para la elección de dicha forma de suministro. De forma preliminar, se ha escogido como manera de abastecimiento la conexión a la red local de abastecimiento de agua.

El agua será almacenada en unos depósitos, y esta agua será tratada previamente a su uso. Los tratamientos llevados a cabo estarán encaminados básicamente a la eliminación, en la medida de las posibilidades y los requerimientos técnicos y económicos, de sales y sólidos en suspensión. Dicha eliminación hará que las incrustaciones en los equipos sean menores, prolongando así la vida útil de los equipos y los periodos entre paradas. Dicha agua será suministrada al proceso a 298 K.

### 7.2.2. Aire

El aire es una mezcla de gases, básicamente nitrógeno (78%), oxígeno (21%) y argón (1%), existiendo trazas de vapor de agua, CO<sub>2</sub>, otros gases nobles, etc. El aire cubre toda la corteza terrestre formando lo que se denomina atmósfera.

El aire es una mezcla usada en múltiples aplicaciones, siendo las más usuales como agente comburente en combustiones, en reacciones de oxidación, en conducciones neumáticas, como refrigerante, etc.

En el proceso en estudio se usa como reactivo en el reactor para la formación de formaldehído. Además de dicha aplicación, existen otras secundarias, como agente para accionamientos neumáticos, refrigeración del interior de edificios, etc.

El aire usado como todas estas aplicaciones será recogido de la atmósfera, pero previo a su suministro habrá unas ligeras operaciones diferentes dependiendo de la aplicación. Así, para su uso como reactivo para la formación de formaldehído, se necesitan operaciones de eliminación de sólidos en suspensión (filtrado) y operaciones de eliminación de humedad (agentes deshumidificantes). Esto se debe a que el agua es un inhibidor de la reacción de formación de formaldehído. En cambio, para refrigeración de edificios no necesitará dichos tratamientos previos.

Las propiedades del aire dependen en gran medida de diferentes variables (presión, temperatura ambiente, estación del año (por los sólidos en suspensión), etc.) Debido a toda esta variación en sus propiedades, se ha supuesto que el aire entrará a temperatura ambiente, escogiéndose una temperatura media del aire de entrada los 298 K.

### **7.2.3. Electricidad**

El uso que se le da a la electricidad en el proceso planta en estudio barre múltiples aplicaciones: alumbrado, suministro a bombas y soplantes, suministro a otras herramientas y equipos, etc.

El suministro eléctrico será garantizado por la red eléctrica de la zona, siendo la frecuencia de la corriente eléctrica 50 Hz.

### **7.2.4. Material de aislamiento**

Es necesario para el aislamiento de los equipos que operan a temperaturas elevadas y para las tuberías que transportan fluidos a temperatura alta un material de aislamiento para el recubrimiento de la superficie exterior. Así, los riesgos a la seguridad de los trabajadores se reducen y las pérdidas de calor al exterior disminuyen (reduciéndose así las pérdidas económicas ocasionadas por ello).

Se ha escogido como material de aislamiento lana de roca porque es un producto que está especialmente indicado para aislamientos térmicos en la industria (altas temperaturas). Dicha lana de roca se obtiene a partir de rocas basálticas: se funde esta roca y se convierte en fibras, transformándose posteriormente en un componente cuya estética recuerda a la lana.

La lana de roca es un producto aislante que está constituido por un entrelazado de filamentos de materiales pétreos que forman un fieltro que mantiene entre ellos aire en estado inmóvil. Dicha estructura permite obtener productos muy ligeros que, por su peculiar configuración,

ofrecen elevados niveles de protección frente al calor, el ruido y el fuego. Están reconocidas internacionalmente como aislantes acústicos, por su estructura flexible, y térmicos, por el entrelazado que mantiene el aire inmóvil, siendo, además, incombustibles, dado su origen inorgánico.

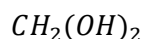
Debido a sus excelentes propiedades como aislante, además de su escaso peso y su fácil maniobrabilidad, hacen que la lana de roca sea el material más adecuado para el aislamiento de los equipos y del sistema de tuberías de la planta en estudio.

### 7.3. Producto

El producto de la planta es formaldehído al 37% en peso en agua, denominada esta mezcla con este porcentaje también como formalina o formol. El formaldehído o metanal posee la siguiente fórmula química:



Es el aldehído más ligero, es un gas a temperatura ambiente, y en contacto con el agua reacciona formando metilenglicol, que es un compuesto muy estable en dicho medio. La fórmula química del metilenglicol es:



El metilenglicol es un compuesto del que no se ha podido comprobar científicamente su existencia, pero todos los datos apuntan a que existe realmente.

El formaldehído al 37% en agua posee multitud de aplicaciones, siendo la principal la elaboración de resinas (urea-formol, fenol-formol y melanina-formol las más usuales) para diferentes usos, siendo el empleo más generalizado de dichas resinas el ser adhesivos para el conformado de papel, corcho y madera (un ejemplo son las maderas laminadas y conglomeradas). Otras aplicaciones del formaldehído son como agente desinfectante, conservante de tejidos orgánicos, en diferentes aplicaciones en la industria electrónica y eléctrica, en la fabricación de fertilizantes, etc.

Las características de este producto de la línea de proceso son las siguientes:

**Tabla 7.3.**  
Propiedades del producto (formaldehído al 37% en agua)

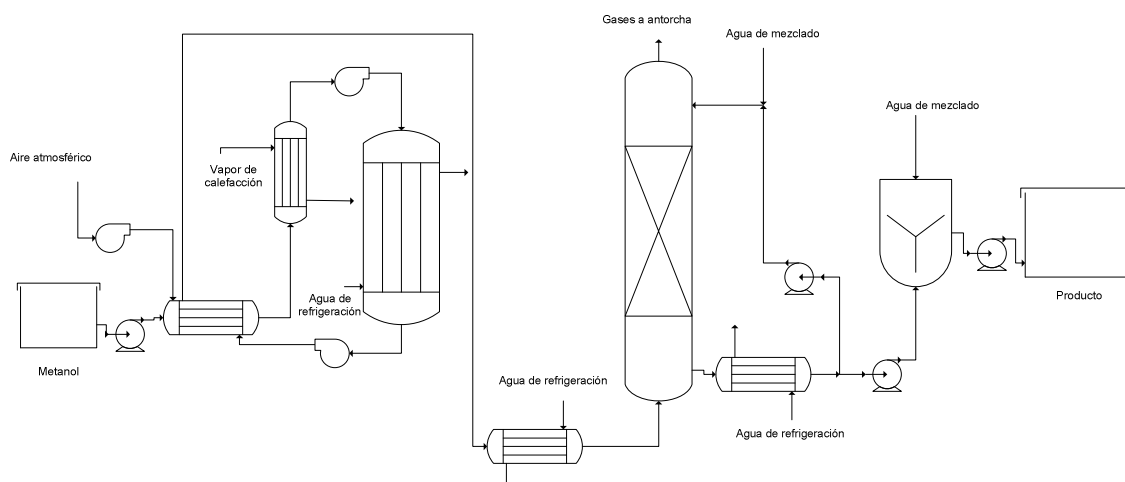
Proporción de formaldehído	37%
Densidad a 25 °C (kg/m <sup>3</sup> )	512,64
Temperatura autoignición (K)	693
Punto de inflamación (K)	335
Temperatura de ebullición (K)	366-369
Temperatura de fusión (K)	258
pH	3-4

Los procesos básicos de obtención del formaldehído se han explicado previamente en el **Capítulo 3** de la presente **Memoria Descriptiva**.

Véase su ficha de seguridad en el **Anexo 15**.

## CAPÍTULO 8: Proceso de obtención de formaldehído

El diagrama de flujo simplificado de la planta que se va a diseñar se puede observar en la siguiente figura. Se puede ver que el proceso consta de 4 intercambiadores de calor, un reactor, una columna de absorción y un mezclador como equipos más importantes, existiendo otros equipos auxiliares como bombas, depósitos, etc. Como se comentó anteriormente, la planta es del tipo basada en catalizadores de óxidos metálicos y la producción de dicha planta es de 22.000 Tm/año de formaldehído al 37% en peso en agua.



**Figura 6.1.** Diagrama de flujo general del proceso

### 8.1. Descripción del proceso

#### 8.1.1. Recepción y almacenamiento de materias primas

El metanol de alimentación estará suministrado por el proceso que se diseña en el PFC **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”**, que es una porción de la planta en la que se encuentra nuestro proceso. Por ello, no se pagará por recibir esta materia prima. El metanol estará almacenado en depósitos que han sido descritos en el Proyecto Fin de Carrera **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”**, y la impulsión de éste metanol se realizará mediante la bomba B-04, la cual le dará la presión necesaria

El aire de alimentación será recogido directamente de la atmósfera, aunque existirá un filtro que elimine las partículas para evitar impurezas e incrustaciones en los equipos. El equipo que se encargará de su impulsión es el soplante V-03.

El catalizador del reactor será suministrado por la empresa “Perstorp Specialty Chemical AB”.

### 8.1.2. Acondicionamiento de las materias primas

Las corrientes de aire atmosférico y metanol de alimentación se mezclarán (la proporción entre ambas corrientes es 3:1 de oxígeno frente a metanol, por lo que se deberá introducir mucho aire al poseer el aire una proporción en oxígeno del 21%) y aumentarán su temperatura en el intercambiador de calor IC-01. Allí se evaporará todo el metanol y la mezcla resultante pasará de 298 K a conseguir una temperatura de 544,07 K gracias al calor cedido por una corriente caliente, que es la corriente de salida del reactor R-01.

Dicho intercambiador estará formado por tubos de acero Carpenter 20 Mo-6 (por dichos tubos pasará la corriente de salida del reactor) y carcasa fabricada con acero inoxidable SA-240 (por ella circulará la mezcla de aire y metanol).

Posteriormente, la mezcla de aire y metanol pasará por otro intercambiador de calor, el IC-02, para ajustar la temperatura hasta los 570 K. Para que dicha corriente alcance esta temperatura se usará como fluido calefactor un vapor proveniente del PFC **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”** cuya temperatura de entrada son 610 K. Este intercambiador poseerá tanto tubos como carcasa de acero inoxidable SA-240.

Después de salir la corriente del intercambiador IC-02, será impulsada por el ventilador V-01 hacia la entrada del reactor R-01.

### 8.1.3. Reacción

La corriente de mezcla de metanol y aire a 570 K entra al reactor por la parte superior, y la corriente de salida de éste se evacuará por la parte inferior. La conversión del metanol en el reactor es del 98%, operando el reactor en condiciones isotérmicas.

Debido a que la reacción es bastante exotérmica, se refrigerará el reactor multitubular mediante agua de la misma planta, con diversos tratamientos para evitar incrustaciones, para que la operación del reactor sea lo más cercana a una operación isotérmica. Esta agua entra a 298 K y abandona la carcasa del reactor a 393 K en estado vapor y una presión de 1,95 atm.

La presión de trabajo del reactor es de 1,25 atm, por lo que se usará solo una válvula de alivio debido a las condiciones de presión bastante suaves. La carcasa del reactor se realizará de acero inoxidable SA-240 (por la carcasa irá el agua de refrigeración) y los tubos estarán fabricados de acero Carpenter 20 Mo-6 (en los tubos estará colocado el catalizador y por ahí circulará la corriente de aire y metanol, convirtiéndose éste último paulatinamente en formaldehído).

### 8.1.4. Enfriamiento

La corriente de salida del reactor será impulsada por el ventilador V-02 al intercambiador IC-01 donde se enfriará gracias a transferir calor al fluido frío compuesto por aire y metanol (el que se comentó anteriormente). Allí el agua que posee a corriente de salida del reactor se

condensará, y la temperatura de dicha corriente será de 350 K. Este intercambiador ha sido explicado en el **Apartado 8.1.2.** del presente capítulo.

Posteriormente, la corriente de salida del reactor pasará al intercambiador de calor IC-03 donde se volverá a enfriar otra vez hasta una temperatura de 310 K. Al alcanzar esta temperatura el metanol que contiene dicha corriente condensa. Para que esta corriente alcance dicha temperatura se usará agua de la planta, que previamente se le habrá realizado diversos tratamientos para evitar incrustaciones, la cual entrará en la carcasa a 298 K.

Este intercambiador poseerá tubos de acero Carpenter 20 Mo-6 (por los tubos circulará la corriente de salida del reactor) y carcasa de acero SA-240 (por ésta circulará el agua de refrigeración). Después de salir la corriente del intercambiador IC-03 será enviada a la entrada del absorbedor A-01.

#### **8.1.5. Acondicionamiento del producto**

La corriente gaseosa (aunque hayan condensado parte de la corriente, como el agua y el metanol, sigue siendo en su mayor parte gas) entra al absorbedor A-01 por su parte inferior, donde se pone en contacto con una corriente líquida formada fundamentalmente por agua y formaldehído. Este contacto hace que el formaldehído pase a esta corriente líquida, al igual que todo el metanol y el agua. Los gases resultantes, en su mayoría nitrógeno y oxígeno, saldrán por la parte superior de la columna, e irán a una antorcha donde se procederá a su combustión.

La corriente líquida de alimentación entrará por la parte superior de esta columna e irá descendiendo por gravedad absorbiendo el metanol, el agua y el formaldehído. La efectividad de esta columna (es decir, cuánto del formaldehído de entrada recoge) se ha fijado en un 99,95%. La columna es una columna de relleno de anillos Raschig de una pulgada, y estará fabricada de acero Carpenter 20 Mo-6. El líquido que va cayendo por la columna será recogido en la parte inferior de ésta, y será transportado al intercambiador de calor IC-04.

Este intercambiador existe debido a que la absorción química del formaldehído en el agua es una reacción exotérmica, por lo que se necesitará disminuir la temperatura de esta corriente de los 350,38 K hasta los 310 K. Dicho intercambiador poseerá como líquido refrigerante agua de la misma planta, con diversos tratamientos para evitar incrustaciones, la cual entrará a la carcasa del intercambiador a 298 K. Dicha carcasa estará construida de acero SA-240, y los tubos del intercambiador, por donde pasa la corriente líquida de salida del absorbedor, serán de acero Carpenter 20 Mo-6.

Después de haberse enfriado, la corriente líquida con formaldehído, agua y metanol será bifurcada en dos al 50%; la primera de ellas será impulsada por la bomba B-01 a la parte alta de la columna de absorción donde será mezclada con una corriente de agua, y posteriormente será introducida al absorbedor A-01 como la corriente líquida de entrada a éste (es decir, se ha producido una recirculación parcial de la corriente líquida de absorbedor A-01). La segunda corriente será impulsada por la bomba B-02 al mezclador M-01.



En este mezclador, la segunda corriente bifurcada se mezclará con agua en la proporción necesaria para alcanzar la concentración requerida del producto (37% en peso de formaldehído en agua). Dicho mezclador, que poseerá agitación mecánica, estará construido en acero Carpenter 20 Mo-6.

#### **8.1.6. Almacenamiento del producto**

La corriente de salida del mezclador M-01 será impulsada mediante la bomba B-03 a un depósito "Rundown", del cual será enviado mediante otra serie de bombas a depósitos de almacenamiento.

El propósito del depósito "Rundown" es la realización de pruebas de calidad del producto antes de acumularlo en los depósitos de almacenamiento final. Dicho depósito poseerá unas dimensiones de 6,096 metros de diámetro y 5,49 metros de altura, obteniéndose así una capacidad de 160,128 m<sup>3</sup>. El depósito "Rundown" almacenará el producto durante dos días y estará fabricado en acero Carpenter 20 Mo-6.

Los depósitos de almacenamiento final serán 4 de las mismas dimensiones, las cuales son 9,144 metros de diámetro y 7,92 metros de altura, obteniéndose así una capacidad de cada uno de 520,416 m<sup>3</sup>. Todos los cuatro depósitos almacenarán el producto durante 7 días y estarán fabricados en acero Carpenter 20 Mo-6.

## CAPÍTULO 9: Diseño del intercambiador IC-01

El intercambiador IC-01 está destinado a ser el equipo donde se va a precalentar y mezclar el aire atmosférico de entrada y el metanol de alimentación al proceso. Para calentarlo se aprovechará el calor de la corriente de salida del reactor R-01, y gracias a esto se enfriará dicha corriente.

Al ser el primer intercambiador del proceso, se expondrán primero unas consideraciones generales sobre los intercambiadores de calor, siendo todas estas consideraciones aplicable al resto de intercambiadores de la planta.

### 9.1. Criterios para el diseño del intercambiador

Los intercambiadores de calor son uno de los equipos que se emplean más ampliamente y asiduamente en la industria química para que las corrientes del proceso alcancen la temperatura deseada, y para conseguir el máximo ahorro de energía posible. Por esto último se suelen enlazar corrientes a calentar con corrientes a enfriar para que el consumo de energía adicional sea mínimo.

#### 9.1.1. Elección del tipo de intercambiador

Los factores más importantes para la elección del tipo adecuado de intercambiador para un servicio concreto son los siguientes:

- Temperaturas de trabajo, y estado de agregación de los fluidos.
- Presiones de las corrientes y pérdidas de presión admisibles.
- Caudales de los fluidos.
- Posibilidades de ensuciamiento del aparato.
- Acción corrosiva de los fluidos.
- Espacio disponible para la instalación.
- Factor económico.

Los intercambiadores de calor más empleados en la industria química son los siguientes:

- **Intercambiadores de calor de doble tubo:**

Se basan en el uso de dos tubos concéntricos por donde circulan los fluidos transfiriéndose el calor a través de la pared que los separa.

Las ventajas de estos intercambiadores son:

- ❖ Fáciles de desmontar.
- ❖ Operando en contracorriente se obtienen altos rendimientos.

Entre sus inconvenientes se encuentran:

- ❖ Riesgos de fugas en los empalmes.
- ❖ Flexión del tubo interior, si es demasiado largo.
- ❖ Superficies de transferencia pequeña en relación con el volumen global del equipo. Esto se debe al radio mínimo de los codos, que limita la aproximación de los tubos.

La utilización de estos intercambiadores está limitada a pequeños caudales.

- **Intercambiadores de calor de carcasa y tubos:**

Es el tipo de intercambiador de calor más usado en la industria química debido a su gran facilidad de limpieza y mantenimiento, a poseer una gran superficie de transferencia, y por ser los más idóneos para intercambio de calor de productos de elevado caudal.

Los intercambiadores de carcasa y tubos están compuestos por una carcasa cilíndrica en cuyo interior se dispone un haz de tubos de pequeño diámetro, paralelamente al eje del cilindro. Un fluido se hace circular por el interior de los tubos, mientras que el otro fluido circula por el interior de la carcasa bañando los tubos del haz por su parte exterior. Existen en la carcasa placas deflectoras que hacen que el fluido que circula por ella circule lo más perpendicular posible al haz de tubos, mejorándose así la transmisión de calor. Esto ocurre también en los tubos, así existen configuraciones de 1, 2, 4, etc. pasos por tubos, y ocurre lo mismo con la carcasa (existen intercambiadores con varios pasos por carcasa)

- **Intercambiadores de calor de placas:**

El diseño de este tipo de intercambiadores está basado en sustituir las superficies tubulares por superficies planas con ciertas rugosidades.

Estos intercambiadores presentan una serie de ventajas:

- ❖ Tienen mayor tasa de transferencia de calor.
- ❖ Producen menos ensuciamiento.
- ❖ Son más fáciles de limpiar.
- ❖ Son de más fácil mantenimiento.
- ❖ Ocupan menos espacio.

Entre los inconvenientes de este tipo de intercambiadores se encuentran:

- ❖ La elección de los fluidos está limitada por la resistencia química de las placas y las juntas, así como por la temperatura de trabajo. El intervalo de temperatura de trabajo para este tipo de intercambiadores es de 25-150°C.
- ❖ El intervalo de presión en los conductos o aberturas de las placas, limitan el caudal que fluye a través de ellas.
- ❖ Son muy caros.

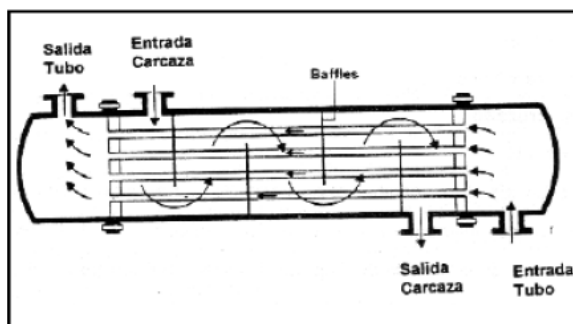
De acuerdo con la información anteriormente citada, no es aconsejable el uso de intercambiadores de placas debido a que:

- El intervalo de temperatura de trabajo en la línea de proceso (hasta los 297 °C) es superior al de operación de este intercambiador (25-150 °C).
- Produce elevadas pérdidas de carga.
- Elevado precio de este intercambiador.

En cuanto a los intercambiadores de doble tubo tampoco son aconsejable porque:

- Presenta superficies de transferencia de calor muy pequeñas.
- El riesgo de fugas que implican, no son adecuados para esta instalación, debido a la presencia del formaldehído, que es un compuesto tóxico.

Por todo lo anterior, en el presente Proyecto se diseñarán intercambiadores de calor en contracorriente del tipo de carcasa y tubos, debido a las ventajas que posee que se comentaron anteriormente. Además, se ha escogido este tipo de intercambiador por las condiciones de operación debido a que los caudales a enfriar y calentar son elevados, además de que el calor intercambiado debe ser también bastante alto.



**Figura 9.1.** Intercambiador de calor de carcasa y tubos (Mc Cabe, Smith y Harriot, 2007)

Por todo ello se empleará este tipo de intercambiadores de calor, además de que son muy eficaces y son los que más se usan en la industria, por lo que más fácilmente se podrá encontrar un proveedor para la compra de estos equipos.

#### **9.1.2. Normativa y código de diseño de intercambiadores de carcasa y tubos**

El código empleado para el diseño de los intercambiadores de calor es el ASME ("American Society of Mechanical Engineers") "Boiler and Pressure Vessels Code"), y en particular, la Sección VIII relativa a recipientes a presión (División 1), la cual establece las normas mínimas de construcción. Para el diseño de los tubos, el código remite a la norma ANSI B31.3.

Las normas TEMA ("Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association") especifican las características mecánicas y térmicas correspondientes a las diversas condiciones de funcionamiento. Concretamente, esta norma sirve para complementar y definir el código ASME para todas las aplicaciones de intercambio de calor de tipo de coraza y tubos.

Los intercambiadores de calor de carcasa y tubos se pueden denominar mediante tres letras, según TEMA:

- La primera letra se refiere al tipo de cabezal estacionario. Los tipos A (canal y cubierta desmontable) y B (casquete) son los más usuales.
- La segunda letra describe la carcasa. La carcasa tipo E, de un solo paso, es la más común. La carcasa F se utiliza generalmente cuando no es posible un único paso por carcasa debido a las diferencias de temperaturas entre el casco y los tubos. En cuanto a los intercambiadores G (tipo "Split") su uso principal es la condensación de vapores, J (de fluido dividido) y H (doble "Split") se emplean para reducir las pérdidas de carga en la carcasa cuando ésta es variable. El intercambiador K (tipo "Kettle") se utiliza cuando se requiere generar vapor. La carcasa X es del tipo flujo cruzado, en la cual se colocan una serie de boquillas de alimentación, y en posición contraria otras de salida.
- La tercera letra índice el tipo de cabezal del extremo posterior. Las denominaciones S (cabezal flotante con dispositivo de apoyo), T (cabezal flotante sin contrabrida) y U (haz de tubo en U) son los más importantes.

Esta misma normativa se aplicará también para el diseño de la unidad de reacción, debido a la similitud que esta comparte con los equipos de intercambio de calor en su morfología (véase Anexo 5).

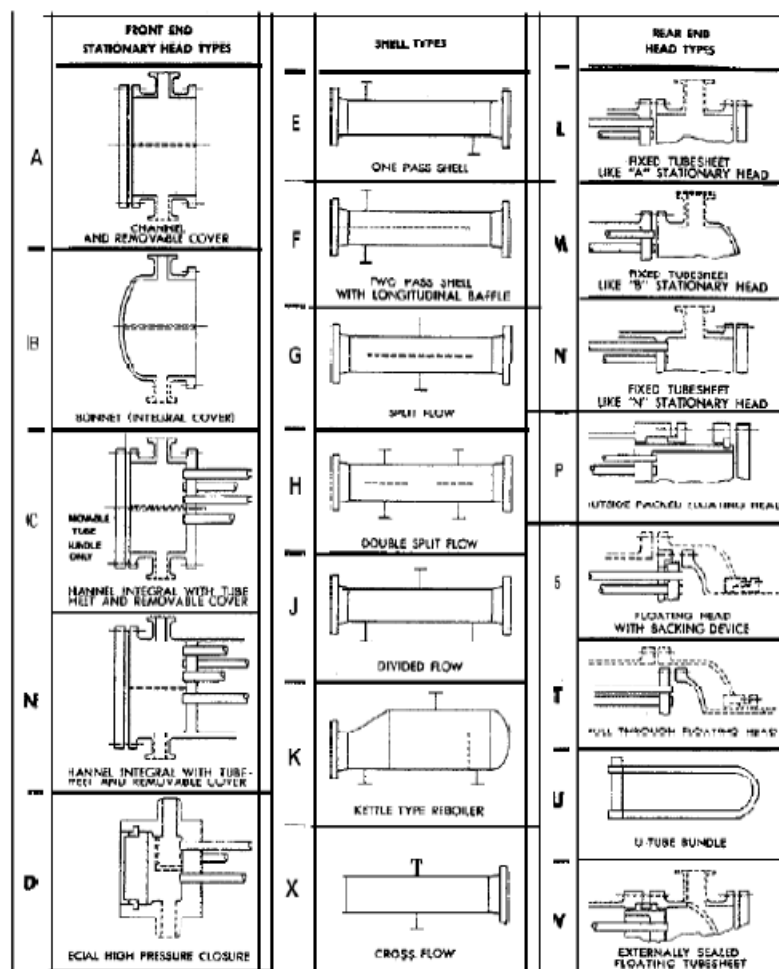


Figura 9.2. Designación tipo TEMA para cambiadores de carcasa y tubos (Normas TEMA)

### 9.1.3. Selección de la trayectoria del flujo

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de un intercambiador de calor de carcasa y tubos es la elección del fluido que circula por la carcasa y de la corriente que circule por el interior de los tubos.

Los criterios para decidir qué fluido circula por los tubos y por la carcasa serán:

1. El fluido más sucio circula por el interior de los tubos, dado que la limpieza mecánica o mediante vapor o agua es más sencilla.
2. El fluido más corrosivo se tiende a situar por el lado de los tubos, para así minimizar el uso de una metalurgia más noble.
3. Por los mismos motivos que los anteriores, el fluido de mayor presión se ubica por el interior de los tubos.
4. El fluido que presenta menor pérdida de presión fluye por la carcasa.
5. El fluido que circula por la carcasa es un líquido de viscosidad elevada o un gas.

### 9.2. Diseño del intercambiador IC-01

Como se comentó anteriormente, se diseñará un intercambiador de calor de carcasa y tubos para el calentamiento de la mezcla de aire atmosférico y metanol de alimentación, y se usará como fluido calefactor la corriente de salida del reactor, que sufrirá un consiguiente enfriamiento. Así, se aprovechará la energía de esta última corriente.

Se elige que la corriente caliente (la corriente de salida del reactor) circule por tubos y la corriente fría (la mezcla de aire y metanol) circule por la carcasa. Se ha decidido esta trayectoria de flujo debido a que la corriente de salida del reactor está a mayor temperatura, y sobre todo, porque esta corriente posee formaldehído el cual debe transportarse en materiales especiales por su corrosividad. Por ello, como se expuso anteriormente, el fluido corrosivo debe ir por el interior de los tubos.

#### 9.2.1. Elementos fundamentales del intercambiador

Los elementos más importantes del intercambiador tipo carcasa y tubos son:

- a) **Carcasa:** el diámetro interior de la carcasa se obtiene dado el número de tubos estándar. Este diámetro se localiza en la **Tabla A.13.5.** del **Anexo 13**, en función de la disposición y el diámetro exterior de los tubos, el pitch, el número de pasos y de tubos. El intercambiador diseñado tiene un diámetro de carcasa de 39 pulgadas. El espesor de la carcasa se determina según las fórmulas del código ASME.

Se fabrica de acero inoxidable SA-240, dado que la temperatura es elevada. Además debido a que la corriente fría contiene metanol, por motivos de seguridad, se usará un acero inoxidable. Por ello se elige un acero inoxidable AISI 316L (o SA-240), de

composición de 18% de cromo, 12% de níquel y 2-4% de molibdeno. La carcasa no poseerá placas deflectoras.

- b) **Tubos:** los tubos se encuentran situados en el interior de la carcasa y paralelamente a ella, y son los componentes básicos de los intercambiadores. Se usan de diámetros comprendidos entre 5/8 a 2 pulgadas, siendo los diámetros más pequeños, es decir, diámetros entre 5/8 y 1 pulgadas, los que se prefieren para la mayoría de servicios debido a que proporcionan intercambiadores más compactos, y por tanto más económicos. Los tubos de mayor diámetro, en cambio, tienen la ventaja de que son más fáciles de limpiar por métodos mecánicos y se suelen seleccionar para fluidos que posean un alto grado de suciedad.

El espesor de los tubos se selecciona para soportar la presión interna y para proporcionar un adecuado sobreespesor de corrosión. El espesor de la pared de los tubos se mide en unidades de calibre de alambre de Birmingham (BWG). Se calculará el espesor adecuado para soportar la presión a la que está sometido el tubo mediante fórmulas que ofrece el Código ASME B31.3 y se tomará el espesor estándar inmediatamente superior.

Los tubos del intercambiador de calor IC-01 presentan un diámetro nominal de 1,25 pulgadas, calibre BWG 13 y una longitud de 2 pies. Se emplearán tubos de acero inoxidable Carpenter 20 Mo-6 debido a que circula por ellos formaldehído.

Los tubos pueden disponerse de forma triangular o cuadrangular. La distribución cuadrada presenta como ventajas el tener una mayor accesibilidad al limpiado externo de los tubos y una menor caída de presión. La distribución triangular proporciona, en cambio, un mayor coeficiente de transmisión de calor y un mayor número de tubos en la carcasa para una misma separación entre los centros de los tubos. El inconveniente que presenta la configuración triangular es una mayor caída de presión y una peor accesibilidad en su limpieza. Dado a que aunque la cantidad de calor a intercambiar es elevada, se elige la distribución cuadrada debido a que al pasar un compuesto bastante tóxico por los tubos (el formaldehído), las garantías de seguridad durante la limpieza deben ser máximas, por lo que esta distribución hará las labores de limpieza más sencillas.

El número de tubos está estandarizado por las normas TEMA, determinándose este valor según las necesidades del área de intercambio de calor, el diámetro exterior de los tubos, el pitch y el número de pasos. Se localizará en la tabla correspondiente el número de tubos que sea inmediatamente superior al calculado. En este caso, el intercambiador diseñado tiene 352 tubos en disposición cuadrada.

- c) **Cabezal de distribución:** elemento similar a la carcasa, cuya función es recibir el fluido que ha de circular por el interior de los tubos, distribuirlo y recolectarlo para mandarlo fuera de él. Se elige cabezal tipo A (canal y carcasa desmontable) por ser el más usado.

- d) **Cabezal de retorno:** tiene como función mandar el fluido fuera del intercambiador cuando éste cuenta con un solo paso (como es el caso) por el lado de los tubos. Este cabezal puede ser de tres tipos: fijo, flotante y haz de tubos en U. En el cabezal fijo, la carcasa y el exterior de los tubos del haz no pueden ser limpiados por métodos mecánicos ni ser inspeccionados físicamente. El haz de tubos en U, supone una gran dificultad para llevar a cabo la limpieza mecánica por el interior de los tubos. En cuanto a los cabezales flotantes, tienen una amplia facilidad de inspección, mantenimiento y reparación. Por tanto se elige éste último. Dentro de los cabezales flotantes se decanta por el cabezal flotante interno, puesto que los de cabezal flotante con empaque externo presentan el inconveniente de necesitar mantenimiento en el empaquetamiento y evitar fugas, mientras que los intercambiadores de cabezal flotante extraíble, requieren mayor diámetro de casco para la misma superficie de intercambio. Será cabezal flotante tipo S, según las normas TEMA.
- e) **“Pitch”:** los orificios de los tubos no se pueden taladrar muy cerca unos de los otros debido a que una franja demasiado estrecha de metal entre los tubos adyacentes debilita estructuralmente el cabezal de tubos. El “pitch” se define como el espacio de centro a centro de los tubos, los cuales pueden estar arreglados en pitch triangular, triangular rotado, cuadrado y cuadrado rotado. Se elige pitch cuadrado para el intercambiador de calor en estudio. Según la norma TEMA, para tubos de 1,25 pulgadas de diámetro, y teniendo en cuenta el número de tubos necesarios para el intercambio, el “pitch” tiene un valor de 1 pulgada y 9/16 (véase **Tabla A.13.5.** del **Anexo 13**).
- f) **Número de pasos:** el número de pasos por los tubos se refiere al número de veces que el fluido del lado de los tubos cambia de dirección al circular por el interior de éstos. La mayoría de los intercambiadores tienen un número de pasos igual a 1, 2, 4, 6 u 8. Debido a que el intercambiador, si se realizan los cálculos, posee unas dimensiones adecuadas con un solo paso por tubos, se ha decidido realizarlo con un solo paso por tubos.
- Lo mismo ocurre con la carcasa, puede existir un solo paso o múltiples pasos. Se elige un intercambiador de calor 1-1 de flujo contracorriente, esto es, el fluido de la carcasa fluye en un paso y el fluido del lado de los tubos circula también en un paso.
- g) **Envolvente:** el número de pasos por la carcasa es único, por lo que el tipo de envolvente utilizado será del tipo E.
- h) **Material de aislamiento:** se emplea lana de roca para el aislamiento de la carcasa del intercambiador. Para la temperatura de operación de este equipo (entre 180°C y 310°C), se requiere un espesor de este material de 80 milímetros (véase **Tabla A.13.18** del **Anexo 13**).



### 9.2.2. Características del intercambiador

Aquí se expondrán las características principales del intercambiador IC-01:

**Tabla 9.1.**  
Características del intercambiador de calor IC-01

Descripción		Intercambiador de calor de carcasa y tubos horizontal
<b>Tubos</b>	Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
	Diámetro exterior	0,03175 m
	Diámetro interior	0,0269 m
	Espesor	$2,413 \cdot 10^{-3}$ m
	Disposición	Cuadrada
	Número de tubos	352
	Pitch	0,0397 m
	Longitud	0,610 m
	Número de pasos	1
<b>Carcasa</b>	Material	Acero SA-240
	Diámetro exterior	0,9906 m
	Espesor	0,00508 m
	Número de pasos	1
<b>Aislamiento</b>	Material	Lana de roca
	Espesor	80 mm

## CAPÍTULO 10: Diseño del intercambiador IC-02

El intercambiador IC-02 está destinado a ser el equipo donde se va a precalentar la corriente de entrada del reactor R-01 hasta la temperatura deseada (en este caso, 570 K), siendo el fluido calefactor vapor de agua proveniente del intercambiador de calor I-03 del PFC “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural**”.

Como se comentó en el **Capítulo 9**, todos los intercambiadores de calor serán de carcasa y tubos, por lo que se diseñará como tal. Se elige que la corriente fría (la corriente de entrada al reactor R-01) circule por tubos y la corriente caliente (vapor de calentamiento) circule por la carcasa. Se ha decidido esta trayectoria de flujo debido a que la corriente de entrada del reactor contiene metanol, que aunque no es un compuesto muy corrosivo, lo es más que el agua, por lo que, siguiendo los criterios que aparecen en el **Apartado 9.1.3. del Capítulo 9**, el fluido más corrosivo debe ir por el interior de los tubos.

### 10.1. Elementos fundamentales del intercambiador

Los elementos más importantes del intercambiador tipo carcasa y tubos son:

- a) **Carcasa:** el diámetro interior de la carcasa se obtiene dado el número de tubos estándar. Este diámetro se localiza en la **Tabla A.13.5. del Anexo 13**, en función de la disposición y el diámetro exterior de los tubos, el pitch, el número de pasos y de tubos. El intercambiador diseñado tiene un diámetro de carcasa de 19,5 pulgadas. El espesor de la carcasa se determina según las fórmulas del código ASME. Se fabricará de acero inoxidable SA-240, dado que la temperatura es elevada y circula metanol. La carcasa no posee placas deflectoras.
- b) **Tubos:** los tubos del intercambiador de calor IC-02 presentan un diámetro nominal de 1,25 pulgadas, calibre BWG 13 y una longitud de 1 pie. Se emplearán tubos de acero inoxidable SA-240 debido a la circulación de vapor de agua a alta temperatura. Dado a que en este caso el intercambio de calor no es muy elevado, se prefiere que las labores de limpieza sean más sencillas, por lo que se usará configuración cuadrada.

El número de tubos está estandarizado por las normas TEMA, determinándose este valor según las necesidades del área de intercambio de calor, el diámetro exterior de los tubos, el pitch y el número de pasos. Se localizará en la tabla correspondiente el número de tubos que sea inmediatamente superior al calculado. En este caso, el intercambiador diseñado tiene 73 tubos en disposición cuadrada.

- c) **Cabezal de distribución:** elemento similar a la carcasa, cuya función es recibir el fluido que ha de circular por el interior de los tubos, distribuirlo y recolectarlo para mandarlo fuera de él. Se elige cabezal tipo A (canal y carcasa desmontable) por ser el más usado.

- d) **Cabezal de retorno:** debido a su facilidad de inspección, mantenimiento y reparación se usarán cabezales flotantes. Dentro de los cabezales flotantes se decanta por el cabezal flotante interno, siendo cabezal flotante tipo S, según las normas TEMA.
- e) **“Pitch”:** se elige “pitch” cuadrado para el intercambiador de calor en estudio, y según la norma TEMA, para tubos de 1,25 pulgadas de diámetro, y teniendo en cuenta el número de tubos necesarios para el intercambio, el “pitch” tiene un valor de 1 pulgada y 9/16 (véase **Tabla A.13.5.** del **Anexo 13**).
- f) **Número de pasos:** al igual que ocurre con el intercambiador IC-01, se elige un intercambiador de calor 1-1 de flujo contracorriente, esto es, el fluido de la carcasa fluye en un paso y el fluido del lado de los tubos circula también en un paso.
- g) **Envolvente:** el número de pasos por la carcasa es único, por lo que el tipo de envolvente utilizado será del tipo E.
- h) **Material de aislamiento:** se emplea lana de roca para el aislamiento de la carcasa del intercambiador. Para la temperatura de operación de este equipo (entre 180 °C y 310 °C), se requiere un espesor de este material de 80 milímetros (véase **Tabla A.13.18** del **Anexo 13**).

## 10.2. Características del intercambiador

Aquí se expondrán las características principales del intercambiador IC-02:

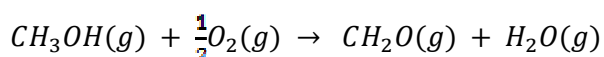
**Tabla 10.1.**  
Características del intercambiador de calor IC-02

Descripción		Intercambiador de calor de carcasa y tubos horizontal
<b>Tubos</b>	Material	Acero SA-240
	Diámetro exterior	0,03175 m
	Diámetro interior	0,0269 m
	Espesor	$2,413 \cdot 10^{-3}$ m
	Disposición	Cuadrada
	Número de tubos	73
	Pitch	0,0397 m
	Longitud	0,3048 m
	Número de pasos	1
<b>Carcasa</b>	Material	Acero SA-240
	Diámetro exterior	0,4953 m
	Espesor	0,00508 m
	Número de pasos	1
<b>Aislamiento</b>	Material	Lana de roca
	Espesor	80 mm

## CAPÍTULO 11: Diseño del reactor R-01

El reactor R-01 está destinado a ser el equipo donde se produzca la reacción para la conversión del metanol en formaldehído, que es nuestro producto final, y éste formaldehído obtenido será acondicionado para su venta por otros equipos que existirán después del reactor.

La reacción básica que se producirá en el reactor será:



Generalmente esta reacción irreversible se lleva a cabo con la ayuda de catalizadores. Como se comentó en el **Capítulo 9** de la presente **Memoria Descriptiva**, se va a usar una planta de tipo de catalizadores metálicos, por lo que el reactor deberá estar acondicionado para contener este tipo de catalizador y las condiciones de operación a las que opera el catalizador.

### 11.1. Tipo de reactor

En Ingeniería Química el reactor es la instalación donde se produce a reacción química existiendo diferentes tipos dependiendo de las características de reactivos y productos, las condiciones de operación y los requisitos técnicos, operacionales, legales, medioambientales, de seguridad, control, etc.

Los tipos básicos de reactores son los reactores homogéneos (todas las sustancias involucradas se encuentran en una misma fase) y heterogéneos (alguna o todas las sustancias involucradas se encuentran en diferentes fases). En nuestro caso, al ser nuestro catalizador un compuesto sólido y los reactivos van a introducirse en fase gas, el tipo de reactor elegido debe ser un reactor heterogéneo.

Dependiendo de las fases que se van a ver involucradas, existirán diferentes clases de reactores que podrán llevar a cabo las reacciones deseadas. Así existen reactores especiales para reacciones gas-líquido, otro para sólido-fluido, otro para sistemas multifásicos, etc. En nuestro caso tenemos dos fases, una sólida y una fluida, por lo que las decisiones se centrarán en los reactores sólido-fluido.

Este tipo de reactores se suelen dividir tradicionalmente en dos grupos: reactores de lecho fijo o empacado, y reactores de lecho fluidizado. En nuestro caso, todavía no se han desarrollado con éxito el catalizador que vamos a usar en forma de partículas que puedan operar con lechos fluidizados, por lo que nos vamos a centralizar en los reactores de lecho fijo.

Existen multitud de tipos de reactores de lecho fijo dependiendo de las características de cada sistema, pero todos se basan en un lecho (o varios lechos) de catalizador inmovilizado por el que pasa el fluido que se quiere reaccionar por la parte superior del reactor. Sobre la superficie

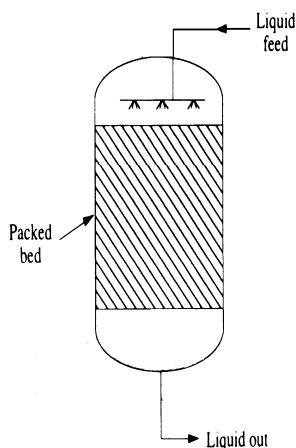
del catalizador el reactivo (o reactivos) se adsorbe y reacciona, formando el producto, que posteriormente se desorberá de la superficie del catalizador. Toda la corriente de fluido compuesta por los productos, los inertes y los reactivos sin reaccionar (además de algunos productos indeseados y otros fluidos) saldrá por la parte inferior del reactor.

Como características generales de los reactores de lecho fijo se pueden describir:

- El comportamiento de este tipo de reactores es muy similar al modelo de reactor de flujo en pistón.
- El tamaño del catalizador en este tipo de reactores no debe demasiado pequeño para que no se disparen las pérdidas de carga y no se formen tapones
- La gran desventaja de este tipo de reactores con respecto a los fluidizados es su menor control sobre la temperatura y la formación de puntos calientes que pueden deteriorar el catalizador.
- La limpieza, regeneración y retirada del catalizador del reactor cuando éste ha perdido su actividad es mucho más complicada que la de un lecho fluidizado.

Dependiendo del número de lecho, refrigeración-calefacción del lecho y otra serie de condiciones se diferencia entre los diferentes tipos de reactores de lecho fijo. Así, como esquemas básicos de lecho fijo se consideran:

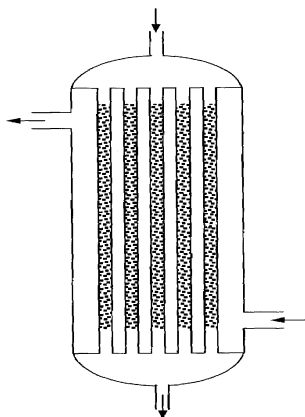
1. **Reactor de lecho fijo típico:** consiste en un reactor tubular donde se coloca sólo un lecho fijo de catalizador, por el que se introducen los reactivos por la parte superior y la corriente de salida deja el reactor por la parte inferior. El gran inconveniente de este reactor es el mal control de la temperatura del lecho al no estar refrigerado o calentado el lecho nada más que por una camisa exterior, formándose puntos calientes en las cercanías al eje central vertical del reactor.



**Figura 11.1.** Esquema de un reactor de lecho fijo típico

2. **Reactor de lecho fijo multitubular:** es muy parecido a un intercambiador de carcasa y tubos, solo que por dentro de los tubos se encuentra el catalizador. El funcionamiento de este tipo de reactor es el mismo que el de un reactor de lecho fijo sólo que la carga

de catalizador se distribuye en los tubos y por fuera de los tubos pasa el fluido calentador-refrigerante. Por tanto el funcionamiento de este tipo de reactores es muy parecido al de varios reactores de lecho fijo en paralelo. Al ser la superficie de transferencia de calor mayor que la de un lecho fijo típico, el control de la temperatura será mucho más adecuado y la formación de puntos calientes será menos acusada (depende mucho del radio de tubo elegido). El problema que posee es que la limpieza del reactor y el recambio de catalizador es mucho más complicada que la de un lecho fijo típico.



**Figura 11.2.** Esquema de un reactor de lecho fijo multitubular

3. **Reactor de múltiples lechos fijos:** consiste en varios lechos fijos consecutivos, es decir, los reactivos van pasando de forma secuencial por los distintos lechos y en éstos se va produciendo la reacción. Entre lecho y lecho se produce un intercambio de calor para calentar o refrigerar la corriente fluida. Por tanto, el funcionamiento de este tipo de reactores es muy parecido al de varios reactores de lecho fijo en serie. Debido a la distribución del catalizador en varios lechos y el calentamiento-refrigeración después de cada etapa, el control de la temperatura es mucho mejor que la de un lecho fijo típico, y la formación de puntos calientes es menor que en éste, aunque estas características suelen ser peores que las de los reactores de lecho fijo multitubulares. Sin embargo, es de los tres reactores en el que la limpieza y la retirada del catalizador es más sencilla. Para el diseño de este tipo de reactores se suelen usar leyes de operación en adiabático.

Generalmente en los procesos industriales para la obtención de formaldehído se usan reactores multitubulares debido a su excelente control de la temperatura (la reacción es altamente exotérmica) a su facilidad de operación y por ser bastante baratos. Por todo ello, se ha elegido diseñar este tipo de reactor, además de por las múltiples ventajas que posee, por uno de los tipos de reactores que se usan normalmente de manera industrial para este proceso (el reactor multilecho, debido a no poseer un control de la temperatura tan exhaustivo como el multitubular se ha desechado, aunque se emplea también en el proceso de obtención de formaldehído).

## 11.2. Catalizador

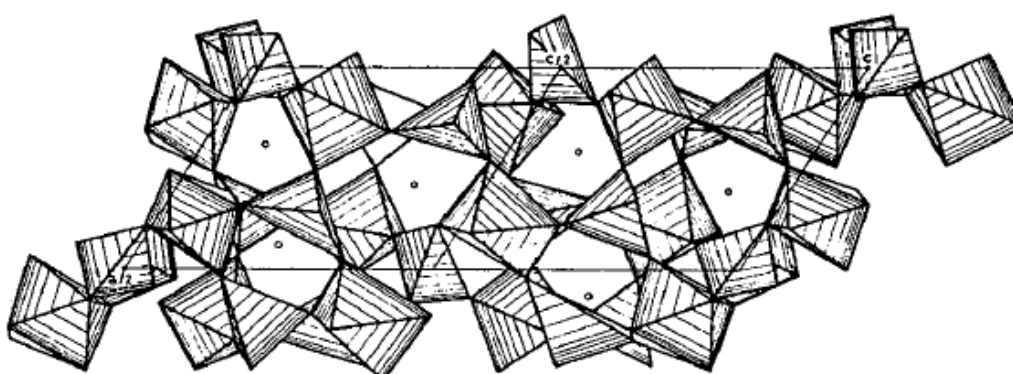
Existen ingentes cantidades de variedades de catalizadores basados en óxidos metálicos que se pueden usar en la reacción de oxidación de metanol a formaldehído, debido a no poder abarcar todos en este documento, vamos a elegir de entre los más empleados en las plantas de obtención de formaldehído el catalizador más usual: catalizador basado en óxidos metálicos mixtos de molibdeno-hierro.

### 11.2.1. Características del catalizador

El catalizador que se va a emplear, como se comentó anteriormente, va a ser un catalizador basado en óxidos metálicos mixtos de hierro-molibdeno. El principio activo de este catalizador es el óxido:  $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$  o molibdato de hierro (III). Existe otro molibdato de hierro que es el molibdato de hierro (II),  $\text{FeMoO}_4$ , el cual no posee actividad catalítica para esta reacción pero interviene en el proceso.

Este tipo de catalizadores no se usan industrialmente como compuestos estequiométricos, sino que son mezclas de óxidos de hierro y molibdeno con un exceso bastante acusado de molibdeno (de 5 a 6 partes de molibdeno por parte de hierro). Esta desviación estequiométrica del compuesto químico ideal es la causante de que la actividad catalítica disminuya, y por tanto el rendimiento de la reacción baje. Pero no existe otra alternativa debido a que fabricar un catalizador con una relación lo más cercana a la estequiométrica es muy complicado debido a que la obtención del catalizador es dificultosa. Así, se ha observado en los catalizadores industriales, que además de  $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$  existe  $\text{MoO}_3$  debido al exceso de molibdeno.

La estructura del catalizador está formada por celdillas unidad, las cuales poseen 16 octaedros de  $\text{FeO}_6$  y 24 tetraedros de  $\text{MoO}_4$ . En toda la estructura existen intersticios, en los cuales se suele introducir  $\text{O}^{2-}$ .



**Figura 11.3.** Estructura del principio activo del catalizador, siendo los puntos los  $\text{O}^{2-}$  intersticiales

Generalmente el catalizador se encuentra soportado sobre alúmina, aunque diferentes estudios (Castelão-Dias, M. Costa et al, 2001) han comprobado que si se soporta el principio

activo sobre  $\text{SiO}_2$  la actividad catalítica es mayor. Esto es debido a que la estructura del  $\text{SiO}_2$  es más parecida a la del  $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$  que la del  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Existen muchas técnicas de preparación del catalizador, siendo la más común la coprecipitación (otras son la impregnación o centrifugado). Esta técnica consiste en la mezcla de disoluciones acuosas de sales o compuestos que reaccionan formando las partículas catalíticas que precipitan. Para este tipo de obtención es muy importante el pH de la disolución resultante debido a que dependiendo es este valor de pH, la actividad del catalizador será mayor o menor.

Existen multitud de técnicas de caracterización que se emplean para la inspección del catalizador, siendo las más comunes la difracción de rayos X, la espectroscopía Mössbauer, la espectroscopía de Raman, los infrarrojos, la microscopía electrónica y el XPS.

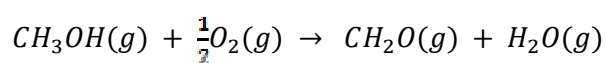
Al catalizador se le suele adicionar una serie de promotores para aumentar sus características; así se le añade Mn y Sb para aumentar la estabilidad del catalizador, y Sn y P para aumentar la selectividad del catalizador por la reacción de oxidación del metanol al formaldehído (la adición de Sn también aumenta la actividad del catalizador).

### 11.2.2. Condiciones de operación

Las condiciones de operación del reactor vendrán dadas por las características termodinámicas y cinéticas de la reacción, la posibilidad de que se produzcan reacciones indeseadas, y por la estabilidad del catalizador.

Generalmente en los reactores que emplean catalizadores de óxidos mixtos de hierro-molibdeno no se usan condiciones demasiado severas (usualmente se usan presiones atmosféricas y temperaturas no superiores a  $400^\circ\text{C}$ ).

La reacción que se produce en el reactor, como hemos comentado anteriormente, es:



Esta reacción se produce gracias a los catalizadores de óxidos de hierro-molibdeno a temperaturas superiores a  $180^\circ\text{C}$ , estando la temperatura óptima para la reacción en el rango de  $270\text{--}330^\circ\text{C}$ . Por ello se va a escoger una temperatura de operación intermedia ( $570\text{ K}$ , o lo que es lo mismo,  $297^\circ\text{C}$ ).

El oxígeno debe encontrarse en exceso, generalmente en relación 3:1, y se usará para ello aire atmosférico, por lo que el caudal que entrará al reactor será en su gran mayoría aire.

La reacción transcurre con aumento de volumen, pero al ser la mayor parte de la corriente aire, este aumento de volumen casi ni se aprecia (si se calcula cuanto aumenta el volumen se



ve que no llega ni siquiera a un 3%), por lo que no se va a tener en cuenta en los cálculos este aumento de volumen.

Como reacciones indeseadas está la reacción de formación de ácido fórmico (HCOOH), el cual se produce al reaccionar una molécula de formaldehído con una molécula de oxígeno. Esta reacción es casi inapreciable a las condiciones de operación, por lo que no se tendrá en cuenta esta desviación en los cálculos.

Se va operar con el reactor isotérmicamente, por lo que la temperatura de entrada, salida y en todo punto del reactor se supondrá constante y con un valor de 570 K. Para la refrigeración del reactor, al ser una reacción exotérmica ( $\Delta H_R^\circ = -158,8$  kJ/mol), se necesitará agua fría que provendrá de la red de agua de la planta.

### 11.2.3. Cinética

La cinética de la reacción estudiada no está completamente definida, existen todavía estudios para intentar hallar una ecuación que tenga en cuenta todos los efectos y características que se pueden encontrar.

Se han estudiado dos tipos básicos de mecanismos de reacción: los de tipo Langmuir y los de Mars-van Krevelen. El primer tipo de mecanismo fue desechado a mediados del siglo pasado, centrándose los estudios en el último tipo de mecanismo de reacción.

Debido a esto, un mecanismo de tipo Mars-van Krevelen desarrollado por Santacesaria (R. Tesser, M- Di Serio, E. Santacesaria et al., 2003), cuya ecuación cinética está bastante aceptada científicamente cuando se opera con ciertas condiciones (las condiciones de operación de validez de esta ecuación son bastante parecidas a las condiciones de operación del reactor R-01). En esta ecuación, por ejemplo, se tiene en cuenta la inhibición por parte del agua que va apareciendo como producto indeseado de la reacción (las ecuaciones anteriores en el tiempo no la tenían en cuenta). La ecuación cinética es:

$$r_c = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot P_m^a \cdot P_{O_2}^b}{k_1 \cdot P_m^a + k_2 \cdot P_{O_2}^b} \cdot \left( \frac{1}{1 + b_w \cdot P_w} \right) \quad [M. 11.1]$$

Los términos  $k_1$ ,  $k_2$  y  $b_w$  son constantes cinéticas dependientes de la temperatura, de las cuales se poseen sus expresiones (véase el **Apartado 5.2.2. del Anexo 5**),  $P_m$  es la presión parcial del metanol,  $P_{O_2}$  la presión parcial del oxígeno y  $P_w$  la presión parcial del agua.

Gracias a esta ecuación cinética y conociendo las condiciones de operación, se puede realizar el cálculo del reactor.

### 11.3. Diseño del reactor

El procedimiento seguido para determinar las dimensiones de un reactor de lecho fijo exige resolver tanto el balance de energía como el balance de materia. Para el caso que se estudia,

los balances de materia y energía se pueden resolver de manera totalmente independientes, usándose el balance de materia para el cálculo de las características del reactor en sí (catalizador, volumen del reactor, etc.) y el balance de energía para calcular las necesidades de refrigeración.

El procedimiento seguido para la obtención de ambos balances se detalla en los **Apartados 5.1.1 y 5.1.2 del Anexo 5** del presente Proyecto Fin de Carrera.

El reactor se alimenta con una corriente de reactivo formada por metanol (con impurezas de hidrógeno) y aire en exceso (el 90% de la corriente aproximadamente es aire; recordar que la reacción se produce al interactuar el metanol con el oxígeno del aire, el nitrógeno es un inerte) proveniente de los intercambiadores donde se ha vaporizado y calentado hasta la temperatura de 570 K. La corriente de salida poseerá la misma temperatura, al operar el reactor en isotérmico, y contendrá nitrógeno, el oxígeno de exceso y el no reaccionado (estos dos compuestos son más del 85 % de la corriente), formaldehído, agua, las impurezas que contenía el metanol de entrada, y el metanol que no ha reaccionado.

#### **11.3.1. Selección de la trayectoria de flujo y caracterización de las corrientes**

Como se comentó anteriormente, la corriente de reactivo procedente de los intercambiadores de calor se introduce en el primer reactor a la temperatura de 570 K. Al operarse en condiciones isotérmicas, durante el transcurso de la reacción deben tomarse medidas para que la reacción, fuertemente exotérmica, no eleve la temperatura de la masa por encima de esta temperatura (una ligera desviación de la temperatura es tolerable, pero se debe intentar que la temperatura no supere los 600 K). Para ello se requiere refrigerar el reactor mediante algún fluido que absorba esta energía desprendida. Como se comentó anteriormente, la refrigeración de esta unidad se llevará a cabo por medio del agua proveniente de la red de la misma. Esta agua se introducirá en el sistema a la temperatura de 30 °C, se evaporará y abandonará la unidad de reacción a 120 °C como vapor de agua que se incorporará a la red de vapor de baja presión de la misma planta.

Se emplea el agua de la red propia de la planta debido a que se aprovecha energéticamente el calor desprendido en el reactor para la producción de vapor, empleándose esta vapor en otros usos necesarios en la planta, por lo que además se tendrá un beneficio económico.

Siguiendo los criterios para la circulación de los fluidos en el interior de un intercambiador de calor (véase **Apartado 9.1.3. del Capítulo 9**), por el interior de los tubos circulará la corriente de reactivo debido a poseer compuestos corrosivos, por lo que el agua de refrigeración circulará por el interior de la carcasa.

#### **11.3.2. Elementos fundamentales del reactor**

Se estudiarán a continuación los principales elementos para el diseño de un reactor multitubular de carcasa y tubos, que son:

- a) **Carcasa:** el diámetro interior de la carcasa del reactor se obtiene mediante el uso de la ecuación de Kern (véase **Apartado 5.7. del Anexo 5**) para un único paso por tubos, y esta magnitud se encuentra que vale 0,9652 metros. El material seleccionado para la carcasa es el acero inoxidable SA-240, debido a ser el agua un compuesto no corrosivo y debido también a la temperatura de operación. La carcasa dispondrá de cuatro placas deflectoras que son las responsables de provocar la agitación del fluido que circula por el exterior de los tubos mejorando así la transmisión de calor.
- b) **Tubos:** la disposición del catalizador de hierro-molibdeno en el interior de los tubos obliga a que éstos solo pueden recorrer un paso. El número de tubos se determina en base a la velocidad de circulación del fluido por el interior de los mismos, mientras que el diámetro se toma de la **Tabla A.13.6. del Anexo 13** que representa el diámetro de los tubos, en disposición cuadrada. Así se calcula que el diámetro exterior es de 1 pulgada, la velocidad de circulación del fluido es de 28,87 m/s y el número de tubos es de 600. Debido a que el fluido que circula por el interior de los tubos es corrosivo (el formaldehído) y a la alta temperatura, el material empleado es el acero Carpenter 20 Mo-6 por ser recomendado para atmósferas de formaldehído. Con la finalidad de facilitar las tareas de mantenimiento y limpieza se ha optado por una disposición cuadrada de los tubos en el interior de la carcasa. Para evitar que las partículas de catalizador contenidas en el interior de los tubos salgan al exterior de éstos, se instalarán finas mallas metálicas en sus extremos. El tamaño de poro inferior de éstas mallas debe ser inferior al diámetro de partícula, y éstas mallas se deben cambiar a la vez que se realice la reposición del catalizador (es decir, una vez al año).
- c) **Cabezal de distribución:** se opta por un cabezal tipo A, canal y carcasa desmontable, para agilizar el proceso de carga y descarga de catalizador en el interior de la unidad de reacción (véase **Figura 9.2. del Capítulo 9**).
- d) **Cabezal de retorno:** se opta por un cabezal de retorno flotante interno puesto que facilita las labores de inspección, mantenimiento y reparación. Éste será tipo T.
- e) **“Pitch”:** para tubos de 1 pulgada de diámetro exterior y con configuración cuadrada este parámetro tiene un valor de 1,25 pulgadas.
- f) **Número de pasos:** el reactor poseerá un paso por carcasa y un paso por tubos, por lo que es idéntico a un intercambiador de calor 1-1 de flujo en contracorriente. La alimentación en fase vapor se introduce por la zona superior del reactor con el fin de evitar la fluidización, mientras que el agua circula en sentido ascendente a través de la carcasa.
- g) **Envolvente:** el número de pasos por carcasa es igual a la unidad por lo que la envolvente empleada será tipo E.
- h) **Aislamiento:** para el aislamiento de la carcasa del reactor se emplea lana de roca. El espesor de ésta se determina en función de la temperatura del fluido que está en contacto con la carcasa, es decir, en este caso la temperatura del agua de

refrigeración, cuya temperatura máxima son de 120°C. Para esta temperatura el espesor del aislante tiene un valor de 50 milímetros (véase la **Tabla A.13.18** del **Anexo 13**).

- i) **Válvula de seguridad y disco de ruptura:** se usará una válvula de seguridad con disco de ruptura incluido para prevenir accidente o sobrepresiones en el sistema, aunque las presiones de diseño son bastante pequeñas.
- j) **Faldones:** el equipo se situará en posición vertical apoyado sobre faldones de acero al carbono SA-285 de 1 metro de altura.

### 11.3.3. Características del reactor

Aquí se expondrán las características principales del reactor:

**Tabla 11.1.**  
Características del reactor R-01

Descripción		Reactor de carcasa y tubos vertical
<b>Tubos</b>	Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
	Diámetro exterior	0,0254 m
	Diámetro interior	0,02057 m
	Espesor	$4,83 \cdot 10^{-3}$ m
	Disposición	Cuadrada
	Número de tubos	600
	Pitch	0,03175 m
	Longitud	3,048 m
<b>Catalizador</b>	Tipo	$\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$
	Masa	500 kg
	Porosidad	0,4
	Densidad de partícula	$1666,67 \text{ kg/m}^3$
<b>Carcasa</b>	Material	Acero SA-240
	Diámetro exterior	0,9652 m
	Espesor	0,00762 m
	Número de pasos	1
<b>Deflectoras</b>	Tipo	Segmentadas
	Número de deflectoras	4
	Espesor	0,0095 m
	Espaciamiento	0,762 m
<b>Soporte</b>	Tipo	Faldones
<b>Aislamiento</b>	Material	Lana de roca
	Espesor	50 mm

#### **11.3.4. Comprobación del correcto funcionamiento**

Ya obtenidas todas las características del reactor se hace necesario determinar el valor de las pérdidas de carga para comprobar que éstas se encuentran dentro de los límites establecidos. Las pérdidas de carga se deben determinar tanto para el fluido que circula por el interior de los tubos como para el que fluye por la carcasa.

Debido a ser un lecho catalítico, las pérdidas de carga por el interior de los tubos se hallan mediante la ecuación de Ergun y tienen un valor igual a 0,17 atm; valor que se considera aceptable puesto que no deben ser superiores a 2 bar (Kirk Othmer, 1985).

En el caso de la carcasa, las pérdidas son menores y se determinan recurriendo al método de Cern, por el cual se obtienen unas pérdidas de carga con un valor de 0,158 Pa.

Ambos cálculos de las pérdidas de carga están recogidos en el **Apartado 5.9.** del **Anexo 5** del presente Proyecto Fin de Carrera.

## CAPÍTULO 12: Diseño del intercambiador IC-03

El intercambiador IC-03 está destinado a ser el equipo donde se va a enfriar la corriente de salida del reactor, que previamente se enfrió en el intercambiador IC-01, hasta una temperatura adecuada para su entrada al absorbedor A-01. El fluido refrigerante será agua líquida procedente de la red de agua de la planta debido a su disponibilidad y a sus buenas características térmicas. Como se comentó en el **Capítulo 9**, todos los intercambiadores de calor serán de carcasa y tubos, por lo que se diseñará como tal.

Se elige que la corriente caliente (la corriente de salida del intercambiador IC-01) circule por tubos y la corriente fría (agua de refrigeración) circule por la carcasa. Se ha decidido esta trayectoria de flujo debido a que la corriente caliente posee formaldehído, que es un compuesto corrosivo, por lo que, siguiendo los criterios que aparecen en el **Apartado 9.1.3. del Capítulo 9**, el fluido más corrosivo debe ir por el interior de los tubos.

### 12.1. Elementos fundamentales del intercambiador

Los elementos más importantes del intercambiador tipo carcasa y tubos son:

- a) **Carcasa:** el diámetro interior de la carcasa se obtiene dado el número de tubos estándar. Este diámetro se localiza en la **Tabla A.13.5. del Anexo 13**, en función de la disposición y el diámetro exterior de los tubos, el pitch, el número de pasos y de tubos. El intercambiador diseñado tiene un diámetro de carcasa de 33 pulgadas. El espesor de la carcasa se determina según las fórmulas del código ASME. Se fabricará de acero inoxidable SA-240. La carcasa no poseerá placas deflectoras.
- b) **Tubos:** los tubos del intercambiador de calor IC-03 presentan un diámetro nominal de 1,25 pulgadas, calibre BWG 13 y una longitud de 2,5 pies. Se emplearán tubos de acero inoxidable Carpenter 20 Mo-6 debido a circular por ellos formaldehído. Debido a la circulación de un compuesto bastante tóxico por los tubos (el formaldehído), las garantías de seguridad durante la limpieza deben ser máximas, por lo que la distribución cuadrada será la más recomendable por hacer las labores de limpieza más sencillas.

El número de tubos está estandarizado por las normas TEMA, determinándose este valor según las necesidades del área de intercambio de calor, el diámetro exterior de los tubos, el pitch y el número de pasos. Se localizará en la tabla correspondiente el número de tubos que sea inmediatamente superior al calculado. En este caso, el intercambiador diseñado tiene 252 tubos en disposición cuadrada.

- c) **Cabezal de distribución:** elemento similar a la carcasa, cuya función es recibir el fluido que ha de circular por el interior de los tubos, distribuirlo y recolectarlo para mandarlo fuera de él. Se elige cabezal tipo A (canal y carcasa desmontable) por ser el más usado.

- d) **Cabezal de retorno:** debido a su facilidad de inspección, mantenimiento y reparación se usarán cabezales flotantes. Dentro de los cabezales flotantes se decanta por el cabezal flotante interno, siendo cabezal flotante tipo S, según las normas TEMA.
- e) **“Pitch”:** se elige “pitch” cuadrado para el intercambiador de calor en estudio, y según la norma TEMA, para tubos de 1,25 pulgadas de diámetro, y teniendo en cuenta el número de tubos necesarios para el intercambio, el “pitch” tiene un valor de 1 pulgada y 9/16 (véase **Tabla A.13.5.** del **Anexo 13**).
- f) **Número de pasos:** al igual que ocurre con el intercambiador IC-01 y el intercambiador IC-02, se elige un intercambiador de calor 1-1 de flujo contracorriente, esto es, el fluido de la carcasa fluye en un paso y el fluido del lado de los tubos circula también en un paso.
- g) **Envolvente:** el número de pasos por la carcasa es único, por lo que el tipo de envolvente utilizado será del tipo E.
- h) **Material de aislamiento:** se emplea lana de roca para el aislamiento de la carcasa del intercambiador. Para la temperatura de operación de este equipo (entre 75 °C y 160 °C), se requiere un espesor de este material de 50 milímetros (véase **Tabla A.13.18** del **Anexo 13**).

## 12.2. Características del intercambiador

Aquí se expondrán las características principales del intercambiador IC-03:

**Tabla 12.1.**  
Características del intercambiador de calor IC-03

Descripción		Intercambiador de calor de carcasa y tubos horizontal
Tubos	Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
	Diámetro exterior	0,03175 m
	Diámetro interior	0,0269 m
	Espesor	$2,413 \cdot 10^{-3}$ m
	Disposición	Cuadrada
	Número de tubos	252
	Pitch	0,0397 m
	Longitud	0,762 m
	Número de pasos	1
Carcasa	Material	Acero SA-240
	Diámetro exterior	0,8382 m
	Espesor	0,00508 m
	Número de pasos	1
Aislamiento	Material	Lana de roca
	Espesor	50 mm

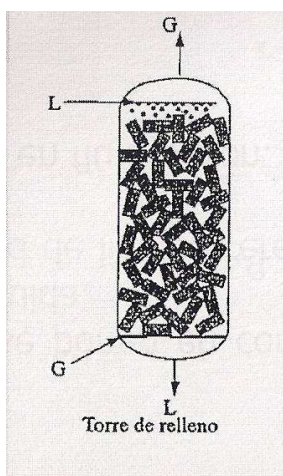
## CAPÍTULO 13: Diseño del absorbedor A-01

El absorbedor A-01 está destinado a ser el equipo donde se produzca el paso del formaldehído gas a estar disuelto en agua. Este equipo es fundamental debido a que el formaldehído se comercializa disuelto en agua en diferentes proporciones. Es un absorbedor con reacción química ya que el formaldehído, en contacto con el agua, reacciona formando metilenglicol, que es un compuesto muy soluble en agua. Como la reacción es reversible, fácilmente el metilenglicol se puede transformar en formaldehído para cuando sea necesario.

### 13.1. Tipo de absorbedor

En la industria química se usan diferentes tipos de absorbedores dependiendo de las características y la aplicación del proceso en cuestión. A pesar de sus diferencias existen algunas características comunes como que el gas siempre entra por la parte baja del absorbedor y el líquido se alimenta por la parte alta para que descienda por gravedad, y que generalmente se suelen usar absorbedores que operan en continuo (aunque existen operaciones en las que se usan en discontinuo, pero no suele ser lo más usual). Como tipos básicos de absorbedores se pueden nombrar:

- **Columnas o torres de relleno:** son columnas que están rellenas con partículas inertes de que pueden ser de diferentes tipos y tamaños, denominadas relleno. Este relleno suministra una gran área superficial de contacto entre el líquido y el gas, que fluyen en contracorriente (aunque también pueden ir en paralelo, pero es menos habitual). Se suelen usar también para absorciones físicas, y producen pérdidas de carga en el gas pequeñas, lo que hace que sean muy adecuados para tratar grandes caudales de gas. En este tipo de absorbedor se puede suponer que ambas fases (líquida y gas) operan en flujo en pistón, y debido a sus bajas retenciones de líquido, los hace idóneos para reacciones rápidas.



**Figura 13.1.** Esquema de una torre de relleno



- **Columnas de pisos o platos:** son columnas provistas de platos en su interior, los cuales son placas con una serie de perforaciones (los cuales pueden ser simplemente orificios, poseer válvulas, etc., existiendo muchos tipos de platos) por las que pasará el gas. El líquido y el gas circulan separados por etapas poniéndose en contacto en cada plato, y dispersándose el gas en la fase líquida. Se puede suponer, al igual que en las torres de relleno, que ambas fases operan en flujo en pistón, y las pérdidas de carga en los platos es baja. Debido a que es mayor la cantidad de líquido retenido frente a las columnas de relleno, se usan para reacciones lentas. Además se suelen emplear para tratar grandes cantidades de líquido o para operaciones por etapas.

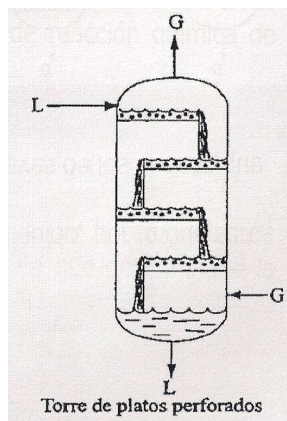


Figura 13.2. Esquema de una torre de platos

- **Columnas de lluvia:** son columnas donde el líquido es dispersado por boquillas en la parte superior de la columna, mientras que el gas asciende por ésta. Por ello, el volumen de la columna es prácticamente ocupado sólo por el gas, siendo el líquido pequeñas gotas que caen por la columna. Al ser el volumen de gas tan grande, las áreas superficiales son pequeñas y las retenciones de líquido también son pequeñas. El área interfacial en las boquillas es bastante alta debido a que se crean pequeñas gotas, pero al coalescer mientras caen se forman gotas mayores que poseen menor área superficial. El gas aquí se comporta como mezcla completa, mientras que el líquido se comporta como flujo en pistón. Se suelen usar para reacciones donde la principal resistencia es la difusión en la fase gaseosa, y por ello se emplean para absorciones relativamente rápidas.

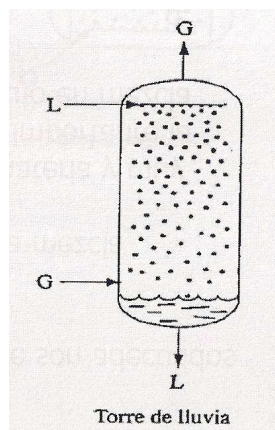
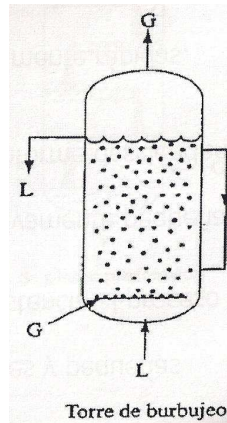


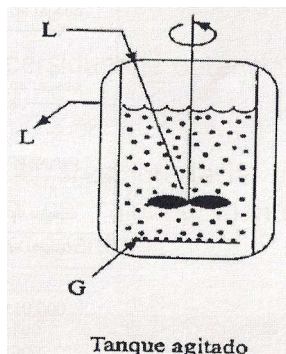
Figura 13.3. Esquema de una columna de lluvia

- **Columnas de burbujeo:** son el contrapunto a las torres de lluvia, es decir, se posee gran cantidad de líquido y el gas burbujea a través de él. Se usa para reacciones lentas donde la resistencia principal es la película líquida, es decir, para absorciones lentas. La retención de líquido es muy alta, y el líquido se asemeja a un comportamiento en mezcla completa. Se puede usar tanto con agitación como sin agitación; con agitación el gas actúa con comportamiento de mezcla completa, y sin agitación actúa como flujo en pistón. El problema de este tipo de columnas es la coalescencia de las burbujas de gas, que reducen drásticamente el área interfacial.



**Figura 13.4.** Esquema de una torre de burbujeo

- **Tanque agitado:** son tanques con agitación mecánica, con grandes retenciones de líquido y el gas burbujea en el líquido. Se usan principalmente cuando las entalpías de reacción son elevadas o cuando las reacciones son muy lentas. El problema de este tipo de absorbedores es cuando se trabaja con fluidos corrosivos, altas presiones o altas temperaturas. EN este caso ambas fases circulan en mezcla completa.



**Figura 13.5.** Esquema de un tanque agitado

Para poder decidir qué tipo de absorbedor es el adecuado para el proceso, se debe determinar un parámetro que indica cuanto de rápida es la reacción. Este parámetro es el Módulo de Hatta, que se define como:

$$M_H = \frac{\sqrt{k \cdot \mathcal{D}_{Al} \cdot C_{Bl}}}{k_{Al}} \quad [M. 13.1]$$

Siendo  $M_H$  el módulo de Hatta,  $k$  la constante cinética de la reacción,  $\mathcal{D}_{Ai}$  la difusividad del compuesto A (en el caso en estudio el compuesto A es el formaldehído) en el líquido,  $C_{Bi}$  es la concentración del reactivo que se encuentra en la fase líquida (en el caso en estudio, el agua), y  $k_{Ai}$  es el coeficiente de transferencia de materia del componente A en el líquido.

Cuando el módulo de Hatta es mayor a 2 la reacción química es casi instantánea frente a la difusión en el líquido y la columna de absorción más adecuada para este tipo de caso es una columna donde exista mucha área interfacial entre el gas y el líquido (por lo que el mejor tipo de absorción es una columna de relleno o una torre de lluvia).

En cambio, cuando módulo de Hatta es menor a 0,02 la reacción química es muy lenta frente a la difusión en el líquido y la columna de absorción más adecuada para este tipo de caso es una columna donde el líquido esté retenido durante mucho tiempo (por lo que el mejor tipo de absorción es una columna de burbujeo, columna de platos o un tanque agitado).

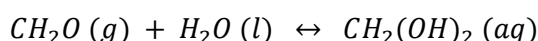
El Módulo de Hatta se debe calcular tanto en la parte superior de la columna como en la parte inferior de ésta, siendo el Módulo de Hatta en los puntos intermedios de la columna valores entre los de los extremos anteriormente calculados.

Para el proceso en estudio, se calcularon los Módulos de Hatta tanto en la parte superior como inferior de la columna y ambos eran mayor a 2 (véase el **Apartado 7.6. del Anexo 7**), por lo que la reacción es rápida. Por ello se descarta el uso de columnas de platos, columnas de burbujeo o tanques agitados. Además se observa que la difusión en la fase gaseosa es bastante buena, por lo que se descarta el uso de columnas de lluvia (recuérdese que el uso principal de este tipo de columnas es cuando la difusividad en el gas es baja).

Por tanto, se usará el tipo de columna de relleno para el proceso, además se puede observar que cumple con las características requeridas (alta área superficial, pérdidas de carga bajas, poca retención de líquido, etc.). Se ha escogido un relleno de anillos Raschig de una pulgada debido a ser bastante habituales en las columnas de relleno, y por ser uno de los rellenos más eficaces (mayor área superficial) a menor coste.

### 13.2. Cinética

La reacción química que se produce en el absorbedor es la siguiente:



Esta reacción es reversible, aunque está muy desplazada a la formación de metilenglicol debido a que es un compuesto muy estable en agua. Es una reacción casi instantánea y el metilenglicol obtenido se puede fácilmente volver a transformar en formaldehído en caso de necesidad.

Es una reacción exotérmica con una entalpía estándar de reacción de -21,4 kJ/mol. Debido a esta entalpía de reacción, se producirá un aumento de temperatura en el absorbedor. Al ser la temperatura a la que se opera muy cercana a 298 K (se opera a 320 K aproximadamente), se

ha supuesto que a esta temperatura la entalpía de reacción es la misma a la estándar (si se calcula el error cometido es de sólo un 3,73%, por lo que no es una suposición descabellada).

El metilenglicol es un compuesto que se supone que existe, pero no se ha comprobado científicamente su existencia con toda seguridad. Por ello no se poseen propiedades ni físicas ni químicas de esta sustancia.

El metanol posee un carácter estabilizador del metilenglicol en el agua, por lo que siempre es necesario tener impurezas de metanol tanto en el absorbedor como en el producto final. Por ello el metanol se conserva de aquí en adelante en la mezcla de formaldehído-agua para que la reacción sea rápida y para que el metilenglicol formado se encuentre estabilizado.

La conversión de esta reacción puede llegar a ser casi total, por lo que en el caso en estudio se va a suponer una conversión del 99,95% del formaldehído que entra en la columna. El gas de salida del absorbedor, al contener formaldehído, aunque en una cantidad ínfima (sólo el 0,05% del formaldehído que entra en la columna), se llevará a antorcha para su combustión debido a los efectos adversos del formaldehído en la salud y el medio ambiente.

Además de esta reacción, se da la formación de poliglicoles al unirse dos moléculas de metilenglicol, y estas moléculas resultantes entre ellas y metilenglicol. Este tipo de reacciones desprenden una molécula de agua. A pesar de ser reacciones que se ha comprobado que existen, son bastante minoritarias, siendo la más preponderante la formación de metilenglicol. Por ello se supone en los cálculos que ésta es la única reacción que se produce.

El absorbedor va a operar a presiones atmosféricas para evitar condiciones severas y por ser la reacción rápida, la temperatura media de las sustancias ronda los 330 K (las corrientes entran a 310 K y salen a temperaturas sobre los 350 K debido a la exotermicidad de la reacción).

Al ser las sustancias que intervienen en el proceso o líquidas y gaseosas, y no poseer impurezas sólidas ni ningún tipo de carácter que provoque ensuciamiento, la absorción no producirá incrustaciones, por lo que sólo se necesitará una columna de absorción al no necesitar limpiezas frecuentes (como ejemplo de columna de absorción con bastantes incrustaciones se puede poner la columna de absorción del PFC “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural**”, en la cual se producen incrustaciones de sosa, y por eso en ese proceso se instalan dos columnas de absorción idénticas para que mientras una de ellas opera, la otra se limpia con ácido clorhídrico diluido).

Por último, es una reacción que no necesita empleo de catalizador.

### 13.3. Diseño del absorbedor

El procedimiento seguido para determinar las dimensiones del absorbedor exige primero ver el aumento de temperatura en éste, para pasar luego a elegir el tipo de absorbedor mediante la determinación de los Módulos de Hatta en las partes superior e inferior de la columna. Después se realiza el cálculo de la altura de la columna de absorción mediante la ecuación de diseño (en el caso en estudio existe una ecuación para columnas de relleno y Módulos de Hatta mayores de 2 que es más simple que la ecuación completa). Finalmente se determina el

espesor de la carcasa y las pérdidas de carga del gas y del líquido. Todo el diseño se puede observar en el **Anexo 7**.

El absorbedor se alimenta con una corriente gaseosa formada por formaldehído, oxígeno, nitrógeno, agua e impurezas de metanol e hidrógeno, y con una corriente de líquido formada por agua, formaldehído disuelto (formando metilenglicol) e impurezas de metanol que estabilizan el metilenglicol en el agua. Las corrientes de salida poseerán mayor temperatura a la de las entradas (las corrientes de alimentación entran a 310 K, y las de salida poseen una temperatura de 350,38 K). La corriente de salida gaseosa es en su mayoría nitrógeno y oxígeno, con impurezas de hidrógeno y trazas de formaldehído. La corriente de salida líquida estará compuesta por agua, formaldehído disuelto e impurezas de metanol.

### 13.3.1. Elementos fundamentales del absorbedor

Se estudiarán a continuación los principales elementos para el diseño de la columna de absorción de relleno, que son:

- a) **Carcasa:** el diámetro interior de la carcasa del reactor se obtiene mediante el uso de la velocidad máxima del gas por la columna (véase **Apartado 7.6. del Anexo 7**), y esta magnitud se encuentra que vale 3,96 metros. El material seleccionado para la carcasa es el acero inoxidable Carpentier 20 Mo-6 debido a que circula por ella formaldehído. El espesor de la columna se obtiene que es de 0,381 cm. La altura de la columna es de 3,72 m.
- b) **Relleno:** el relleno, como se comentó anteriormente, es de anillos Raschig de 1 pulgada, y este relleno posee una porosidad de 0,73 y un área interfacial por unidad de volumen de  $122 \text{ ft}^{-1}$ . Se usará también de Acero Carpentier 20 Mo-6.
- c) **Fondos:** se opta por unos fondos toriesféricos por ser los más empleados en la industria. Se usará tipo Korrbogen por ser la relación altura/diámetro mayor a 10. Su material y espesor será idéntico al del resto de la columna.
- d) **Pescantes y bocas de hombre:** al tratarse de un recipiente vertical, se instalará un pescante de capacidad suficiente para desmontar la columna cuya capacidad nunca será inferior a 500 kg. Debido al relleno, solo se poseerá una boca de hombre en la parte alta de la columna. La inspección y mantenimiento necesario de la columna sin relleno se realizará a partir de esa altura alcanzando la cota mínima mediante arneses y cuerdas con seguridad. La boca de hombre estará colocadas de forma que se eviten los riesgos personales que pudieran producirse al entrar o salir el personal.
- e) **Aislamiento:** para el aislamiento de la carcasa del absorbedor se emplea lana de roca. El espesor de ésta se determina en función de la temperatura máxima del fluido que está dentro de la columna, es decir, unos  $78^\circ\text{C}$ . Para esta temperatura el espesor del aislante tiene un valor de 50 milímetros (véase la **Tabla A.13.18 del Anexo 13**).

- f) **Válvula de seguridad y disco de ruptura:** se usará una válvula de seguridad con disco de ruptura incluido para prevenir accidente o sobrepresiones en el sistema, aunque las presiones de diseño son bastante pequeñas.
- g) **Soportes:** el equipo, al situarse en posición vertical, necesitará de soportes, escogiéndose faldones para su apoyo debido a que la relación altura/diámetro es mayor a 10. Los faldones irán soldados al fondo inferior, de forma que los diámetros medios del faldón y de la envolvente coincidan, disponiendo de una abertura de acceso. No se permitirán uniones bridadas o roscadas en el interior del los faldones ni se soldarán por el exterior de la carcasa. Las tuberías del fondo del recipiente llevarán un codo de 90° y una tubería horizontal de prolongación hasta el exterior del faldón terminada en brida. Toda tubería que atravesase el faldón necesitará un collarín para no debilitar la función de soporte, teniendo éstos el tamaño suficiente para admitir el calorifugado y la expansión térmica.

### 13.3.2. Características del absorbedor

Aquí se expondrán las características principales del absorbedor:

**Tabla 13.1.**  
Características del absorbedor A-01

Descripción		Columna de absorción de relleno vertical
<b>Relleno</b>	Tipo	Anillos Raschig
	Dimensión normalizada	1 pulgada (0,0254 m)
	Porosidad	0,73
	Área interfacial por unidad de volumen	37,186 m <sup>-1</sup>
<b>Carcasa</b>	Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
	Diámetro interior	3,96 m
	Espesor	0,00381 m
	Altura	3,72 m
<b>Soporte</b>	Tipo	Faldones
<b>Aislamiento</b>	Material	Lana de roca
	Espesor	50 mm

## CAPÍTULO 14: Diseño del intercambiador IC-04

El intercambiador IC-04 está destinado a ser el equipo donde se va a enfriar la corriente de salida del absorbedor A-01, de la cual parte se recirculará a dicha columna de absorción y parte se dirigirá al mezclador M-01, para obtener la concentración de formaldehído en agua necesaria. El fluido refrigerante será agua líquida procedente de la red de agua de la planta debido a su disponibilidad y a sus buenas características térmicas.

Como se comentó en el **Capítulo 9**, todos los intercambiadores de calor serán de carcasa y tubos, por lo que se diseñará como tal.

Se elige que la corriente caliente (la corriente de salida del absorbedor A-01) circule por tubos y la corriente fría (agua de refrigeración) circule por la carcasa. Se ha decidido esta trayectoria de flujo debido a que la corriente caliente posee formaldehído, que es un compuesto corrosivo, por lo que, siguiendo los criterios que aparecen en el **Apartado 9.1.3. del Capítulo 9**, el fluido más corrosivo debe ir por el interior de los tubos.

### 14.1. Elementos fundamentales del intercambiador

Los elementos más importantes del intercambiador tipo carcasa y tubos son:

- a) **Carcasa:** el diámetro interior de la carcasa se obtiene dado el número de tubos estándar. Este diámetro se localiza en la **Tabla A.13.5. del Anexo 13**, en función de la disposición y el diámetro exterior de los tubos, el pitch, el número de pasos y de tubos. El intercambiador diseñado tiene un diámetro de carcasa de 8 pulgadas. El espesor de la carcasa se determina según las fórmulas del código ASME. Se fabricará de acero inoxidable SA-240.

Existirá un espaciamiento de 0,80 metros entre placas deflectoras segmentadas. Si se tiene en cuenta la longitud del cambiador, se obtiene 3 placas deflectoras.

- b) **Tubos:** los tubos del intercambiador de calor IC-04 presentan un diámetro nominal de 0,75 pulgadas, calibre BWG 13 y una longitud de 7 pies. Se emplearán tubos de acero inoxidable Carpenter 20 Mo-6 debido a circular por ellos formaldehído.

Debido a la circulación de un compuesto bastante tóxico por los tubos (el formaldehído), las garantías de seguridad durante la limpieza deben ser máximas, por lo que la distribución cuadrada será la más recomendable por hacer las labores de limpieza más sencillas.

El número de tubos está estandarizado por las normas TEMA, determinándose este valor según las necesidades del área de intercambio de calor, el diámetro exterior de los tubos, el pitch y el número de pasos. Se localizará en la tabla correspondiente el

número de tubos que sea inmediatamente superior al calculado. En este caso, el intercambiador diseñado tiene 26 tubos en disposición cuadrada.

- c) **Cabezal de distribución:** elemento similar a la carcasa, cuya función es recibir el fluido que ha de circular por el interior de los tubos, distribuirlo y recolectarlo para mandarlo fuera de él. Se elige cabezal tipo A (canal y carcasa desmontable) por ser el más usado.
- d) **Cabezal de retorno:** debido a su facilidad de inspección, mantenimiento y reparación se usarán cabezales flotantes. Dentro de los cabezales flotantes se decanta por el cabezal flotante interno, siendo cabezal flotante tipo S, según las normas TEMA.
- e) **“Pitch”:** se elige “pitch” cuadrado para el intercambiador de calor en estudio, y según la norma TEMA, para tubos de 0,75 pulgadas de diámetro, y teniendo en cuenta el número de tubos necesarios para el intercambio, el “pitch” tiene un valor de 1 pulgada (véase **Tabla A.13.5. del Anexo 13**).
- f) **Número de pasos:** al igual que ocurre con el resto de intercambiadores anteriormente citados, se elige un intercambiador de calor 1-1 de flujo contracorriente, esto es, el fluido de la carcasa fluye en un paso y el fluido del lado de los tubos circula también en un paso.
- g) **Envolvente:** el número de pasos por la carcasa es único, por lo que el tipo de envolvente utilizado será del tipo E.
- h) **Material de aislamiento:** se emplea lana de roca para el aislamiento de la carcasa del intercambiador. Para la temperatura de operación de este equipo (entre 75 °C y 160 °C), se requiere un espesor de este material de 50 milímetros (véase **Tabla A.13.18 del Anexo 13**).

## 14.2. Características del intercambiador

Aquí se expondrán las características principales del intercambiador IC-04:



**Tabla 14.1.**  
Características del intercambiador de calor IC-04

Descripción		Intercambiador de calor de carcasa y tubos horizontal
<b>Tubos</b>	Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
	Diámetro exterior	0,0191 m
	Diámetro interior	0,0143 m
	Espesor	$2,413 \cdot 10^{-3}$ m
	Disposición	Cuadrada
	Número de tubos	26
	Pitch	0,0254 m
	Longitud	2,134 m
	Número de pasos	1
<b>Carcasa</b>	Material	Acero SA-240
	Diámetro exterior	0,2032 m
	Espesor	0,00508 m
	Número de pasos	1
<b>Deflectoras</b>	Tipo	Segmentadas
	Número de deflectoras	3
	Espesor	0,00476 m
	Espaciamiento	0,713 m
<b>Aislamiento</b>	Material	Lana de roca
	Espesor	50 mm

## CAPÍTULO 15: Diseño del mezclador M-01

El mezclador M-01 es el equipo que se encarga de obtener el producto final con las características deseadas a partir de mezclar una parte de la corriente líquida de la salida del absorbedor A-01 con agua.

Debido a que el mezclador es en sí mismo un tanque pero agitado, se emplean para su cálculo las ecuaciones y expresiones del diseño de depósitos. Así, se usará un mezclador cilíndrico vertical de techo flotante cubierto (véase el **Capítulo 16** de la presente **Memoria Descriptiva** para observar los diferentes tipos de depósitos y sus ventajas e inconvenientes). Se usará este tipo de tanque por ser la sustancia que se va a almacenar un líquido con contenido en volátiles, y cubierto para evitar pérdidas de producto.

El diseño del mezclador se basará, al igual que ocurrirá con los depósitos de almacenamiento, en la publicación que realiza el Instituto Americano del Petróleo, al que esta institución designa como “STANDAR A.P.I. 650” (para más características de esta norma véase el **Capítulo 16** de la presente **Memoria Descriptiva**). Además se diseñará el mezclador conforme a lo establecido por reglamentación sobre aparatos a presión de acuerdo al Código ASME Sección VIII División I.

Se diseña el mezclador como un tanque de almacenamiento para un caudal de salida de 22.000 Tm/año (se suma el caudal de agua con el del formaldehído en agua) y para un periodo de almacenamiento de 30 minutos. Así se debe almacenar un volumen de producto de 1,504 m<sup>3</sup>. Si se considera la norma API 650 se diseña el mezclador con una capacidad de 1,667 m<sup>3</sup> debido a que debe poseer un 10% de exceso para evitar derrames y fugas. Se expondrán a continuación algunas de las características del mezclador:

- **Disposición, fondo y cabezal:** el tanque presenta una disposición cilíndrica vertical y fondo plano. Con respecto al cabezal consiste en un techo tipo flotante, por tratarse del más adecuado para el almacenamiento del líquido que se encuentra dentro del mezclador.
- **Material:** el material elegido para almacenar el líquido es acero inoxidable Carpenter 20 Mo-6 debido a ser el recomendado para el transporte y almacenamiento de formaldehído.
- **Bocas de hombre:** los tanques necesitan por lo menos una entrada de hombre en el cuerpo o en el techo con la finalidad de poder realizar limpieza, revisiones o reparaciones en el interior del tanque. Al ser el mezclador un tanque muy pequeño, se hará uso exclusivo de una boca de hombre, pero se preferirá limpiar el mezclador con un gran caudal de agua a introducirse una persona dentro (las dimensiones internas del tanque son 1,295 m de altura y 1,280 m de diámetro, por lo que las personas deberán estar agachadas y con poco rango de maniobra).

- **Sistema de venteo:** al igual que ocurre en los depósitos (véase el **Apartado 16.1.** de la presente **Memoria Descriptiva**) se debe disponer de sistemas de venteo de presión para prevenir la formación de vacío o presión interna y para evitar la deformación del techo o de las paredes del recipiente. Por ello se necesitará de una válvula tipo presión-vacío, la cual se colocará en el techo del mezclador.
- **Soporte de los tanques:** el mezclador irá montados en una cimentación de hormigón que tendrán una altura de 0,5 metros.
- **Escaleras de acceso:** el mezclador poseerá una pequeña escalera de acceso. Las escaleras de acceso tienen la finalidad de situar al personal que así lo requiera en una zona del tanque que necesite de constante mantenimiento o supervisión, generalmente sobre el techo y la entrada de hombre, además de brindar protección y seguridad al personal.
- **Accesorios:** el mezclador dispondrá de dos tuberías de llenado (una para el agua y otra para la mezcla agua-formaldehído), en conexión roscada. La descarga de líquido se realizará por la parte inferior de la carcasa mediante una tubería con conexión bridada.
- **Agitación:** la agitación vendrá dada por una turbina de 0,457 m de diámetro, una anchura de hélices de 0,091 m y que deberá estar colocada a 0,457 m del fondo del tanque. La potencia del motor que mueva el agitador debe ser de 2,2 CV (1491 W).
- **Placas deflectoras:** deberán existir 4 placas deflectoras en el mezclador para la buena agitación del líquido, y todas tendrán una anchura de 0,137 m. EL material de la que estarán realizadas será el mismo que el resto del tanque.

**Tabla 15.1.**

Datos de diseño del mezclador M-01

Descripción	Mezclador de techo flotante cubierto
Unidades	1
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
Volumen total	1,667 m <sup>3</sup>
Volumen útil	1,504 m <sup>3</sup>
Diámetro interior	1,280 m
Altura	1,295 m
Espesor de la carcasa	3,81 mm
Espesor del fondo plano	3,81 mm
Espesor del techo flotante	3,81 mm
Soporte del tanque	Soporte de hormigón de 0,5 m
Accesorios	Sistema de venteo, boca de hombre y escalera de acceso
Agitación	Turbina colocada a 0,457 m del fondo del tanque, con diámetro de 0,457 m, anchura de hélices de 0,091 m y motor de 1491 W de potencia
Placas deflectoras	4 placas con un espesor de 0,137 m

## CAPÍTULO 16: Diseño del sistema de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento de líquidos que se usan en la industria química se clasifican en:

- Cilíndricos horizontales.
- Cilíndricos verticales de fondo plano.

Los tanques cilíndricos horizontales, son generalmente de volúmenes relativamente bajos a causa de que presentan problemas por fallas de corte y flexión.

Los tanques cilíndricos verticales de fondo plano permiten almacenar grandes cantidades volumétricas con un costo bajo, pero poseen la limitación de que sólo se pueden usar a presión atmosférica o presiones internas relativamente pequeñas.

Debido a que se desea almacenar un gran volumen de producto (formaldehído al 37% en agua), se emplearán depósitos cilíndricos verticales montados sobre una estructura de hormigón (Branan, Carl R. 2000).

De acuerdo al estándar API 650, se clasifican los tanques verticales según el tipo de techo. Este tipo de tanques pueden ser:

- De techo fijo.
- De techo flotante.
- Sin techo.

Los tanques de techo fijo se emplean para almacenar productos no volátiles o de bajo contenido de ligeros (no inflamables) como son: agua, diesel, asfalto, petróleo crudo, etc.

Los tanques de techo flotante se emplean para almacenar productos con alto contenido de volátiles como son: alcoholes, gasolinas y combustibles en general. Este tipo de techo fue desarrollado para reducir o anular la cámara de aire, o espacio libre entre el espejo del líquido y el techo, además de proporcionar un medio aislante para la superficie del líquido. Además de todo lo anterior se reduce la velocidad de transferencia de calor al líquido almacenado durante los periodos de altas temperaturas ambientales, evitando la formación de gases (la evaporación del líquido o la emisión de volátiles que se encuentran disueltos en el líquido), disminuyendo así la contaminación del ambiente y, al mismo tiempo se reducen los riesgos al almacenar productos inflamables.

Los tanques sin techo se emplean para almacenar productos en los cuales no es importante que éste se contamine o que se evapore a la atmósfera como el caso del agua cruda, residual, contra incendios, etc.

En el presente Proyecto Fin de Carrera, para el almacenamiento del producto final se van a escoger depósitos verticales de techo flotante, puesto que el producto contiene compuestos volátiles (el formaldehído hay que recordar que aunque está disuelto, a temperatura ambiente es un gas). Así se evita que exista una cámara de vapor compuesta por formaldehído entre la superficie de líquido y el techo, que puede ocasionar riesgos a la seguridad del tanque, al medio ambiente y a las personas.

Existen dos tipos de techos flotantes: los cubiertos que son aquellos que no están en contacto directo con la radiación solar y precipitaciones pluviales gracias a que existe un techo fijo que protege al flotante; y los techos flotantes externos, los cuales no cuentan con un techo fijo, por lo que éste se encontrará en contacto con el medio ambiente.

Por ello, se usarán techos flotantes cubiertos debido a que se almacenan productos volátiles, de manera que así se asegura una menor pérdida de producto almacenado en forma de vapor, puesto que se protege el tanque de la radiación solar.

El diseño y cálculo de depósitos, se basa en la publicación que realiza el Instituto Americano del Petróleo, al que esta institución designa como "STANDAR A.P.I. 650", para tanques de almacenamiento a presión atmosférica y "STANDAR A.P.I. 620", para tanques de almacenamiento sometidos a presiones internas cercanas a  $1 \text{ kg/cm}^2$ . El "STANDAR A.P.I. 650" sólo cubre aquellos tanques en los cuales se almacenan fluidos líquidos y están contruidos de acero con el fondo uniformemente soportado por una cama de arena, grava, asfalto, etc. Estos tanques deben estar diseñados para soportar una presión de operación atmosférica o presiones internas que no excedan el peso del techo por unidad de área, una temperatura de operación no mayor de  $93^\circ\text{C}$  ( $200^\circ\text{F}$ ), y que no se usen para servicios de refrigeración. Este estándar cubre el diseño y cálculo de los elementos constitutivos del tanque.

Además, cuando sea de aplicación, se diseñan los tanques conforme a lo establecido por reglamentación sobre aparatos a presión, y por tanto, como se ha hecho en los demás equipos, de acuerdo al Código ASME Sección VIII División I.

### **16.1. Diseño de los depósitos**

Se diseñan los tanques de almacenamiento de producto final para un caudal de salida de  $22.000 \text{ Tm/año}$  y para un periodo de almacenamiento de 7 días. Así se debe almacenar un volumen de producto de  $505,082 \text{ m}^3$ . Si se considera la norma API 650, se diseñan dos depósitos de con una capacidad de  $520,416 \text{ m}^3$  cada uno debido a que deben estar llenos como máximo al 50%.

Además se debe sobredimensionar el número de depósitos, al menos por duplicado, para almacenar el producto en caso de producirse cualquier imprevisto que impida la salida del producto, por lo que se instalan 4 depósitos de producto final de las mismas dimensiones que los depósitos anteriormente citados.

Además, para realizar pruebas de control de calidad del producto, se diseña un tanque Rundown que recoge el producto durante dos días antes de almacenarlo en los tanques de producto y desecharlo antes de mezclarlo con el resto del producto final en el caso de que éste no cumpla con las características mínimas especificadas para su venta. Este tanque tiene una capacidad de 160,128 m<sup>3</sup>.

Se expondrán a continuación algunas de las características de los depósitos:

- **Disposición, fondo y cabezal:** los depósitos presentan disposición cilíndrica vertical y fondo plano. Esta disposición se debe a que el volumen de almacenamiento es superior a 1.000 gal, y por tanto, esta disposición es la más adecuada para el almacenamiento de este reactivo [Branan, Carl R. 3ª Edición]. Con respecto al cabezal consiste en un techo tipo flotante, por tratarse del más adecuado para el almacenamiento del producto final.
- **Material:** el material elegido para almacenar el producto final es acero inoxidable Carpenter 20 Mo-6 debido a ser el recomendado para el transporte y almacenamiento de formaldehído.
- **Sistema de venteo:** los depósitos deben disponer de sistemas de venteo de presión para prevenir la formación de vacío o presión interna, para evitar la deformación del techo o de las paredes del recipiente, como consecuencia de las variaciones de presión producidas por efecto de los llenados, vaciados o cambios de temperatura. Este sistema de venteo consistirá en una válvula tipo presión-vacío, que se colocará en el techo del depósito. Estas válvulas actúan de manera que cuando el tanque se está llenando, deja salir aire del interior para que no presurice, y cuando el tanque se está vaciando, deja entrar aire para que no se haga vacío en su interior.

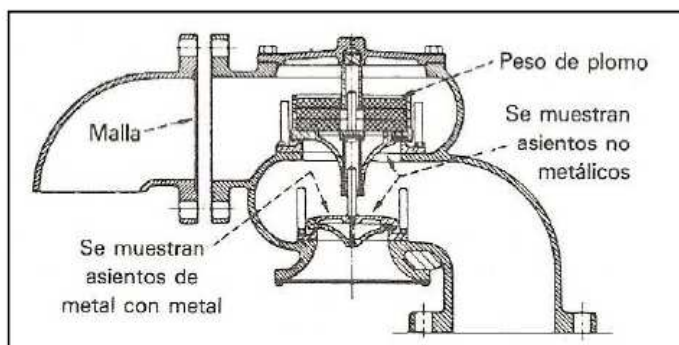


Figura 14.1. Respiradero de tanques (Greene, Richard, W., 1987)

- **Soporte de los tanques:** los depósitos irán montados en una cimentación de hormigón que tendrán una altura de 0,5 metros.
- **Bocas de hombre:** los tanques de almacenamiento contarán, por lo menos con una entrada de hombre en el cuerpo o en el techo con la finalidad de poder realizar limpieza, revisiones o reparaciones en el interior del tanque.

**Tabla 16.1.**

Número mínimo de bocas de hombre (Norma API 650)

Diámetro nominal del tanque m (ft)	Mínimo número
$D \leq 61$ (200)	2
$61 (200) < D \leq 91$ (300)	3
$91 (300) < D$	4

Según la tabla anterior, los depósitos de diámetro menor a 61 metros (como es el caso de los tanques que hay en la planta) deben disponer de al menos dos bocas de hombre. Las bocas de hombre tendrán, siguiendo la norma API 650, un diámetro de 20 in, y se situarán en la zona inferior de la carcasa.

- **Escaleras de acceso:** los tanques dispondrán de una escalera de acceso. Las escaleras de acceso tienen la finalidad de situar al personal que así lo requiera en una zona del tanque que necesite de constante mantenimiento o supervisión, generalmente sobre el techo y la entrada de hombre, además de brindar protección y seguridad al personal.
- **Accesorios:** los depósitos disponen de una tubería de llenado, en conexión roscada. La descarga de líquido se realizará por la parte inferior de la carcasa mediante una tubería con conexión bridada.

A continuación se recogen a modo de resumen las características más importantes de los depósitos de almacenamiento diseñados:

**Tabla 16.2.**

Datos de diseño de los depósitos de almacenamiento

Descripción	Depósitos de techo flotante cubierto
<b>Unidades</b>	4
<b>Material</b>	Acero Carpenter 20 Mo-6
<b>Volumen total</b>	520,416 m <sup>3</sup>
<b>Volumen útil</b>	252,591 m <sup>3</sup>
<b>Diámetro interior</b>	9,144 m
<b>Altura</b>	7,920 m
<b>Espesor de la carcasa</b>	6,35 mm
<b>Espesor del fondo plano</b>	6,35 mm
<b>Espesor del techo flotante</b>	3,81 mm
<b>Soporte del tanque</b>	Soporte de hormigón de 0,5 m
<b>Accesorios</b>	Sistema de venteo, 2 bocas de hombre y escalera de acceso

**Tabla 16.3.**

Datos de diseño del depósito "Rundown"

Descripción	Depósitos de techo flotante cubierto
Unidades	1
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
Volumen total	160,128 m <sup>3</sup>
Volumen útil	144,338 m <sup>3</sup>
Diámetro interior	6,096 m
Altura	5,490 m
Espesor de la carcasa	5,08 mm
Espesor del fondo plano	5,08 mm
Espesor del techo flotante	3,81 mm
Soporte del tanque	Soporte de hormigón de 0,5 m
Accesorios	Sistema de venteo, 2 bocas de hombre y escalera de acceso

## 16.2. Cubeto de retención

Los depósitos de almacenamiento de producto final se situarán dentro de un cubeto de retención para evitar el derrame incontrolado del fluido contenido en los mismos en caso de ruptura.

Según especificaciones de Refinería CEPESA ESP-0200-1, la distancia mínima horizontal entre el recipiente y la pared del cubeto será al menos la altura del tanque de mayor longitud. En este caso se fija en 8 metros. En cuanto a la capacidad del cubeto, será como mínimo la capacidad útil del recipiente mayor, y dado que se aumenta este valor un 10%, se toma como capacidad del cubeto 572,46 m<sup>3</sup>. La altura del cubeto se determina al conocer el área y el volumen de éste. En función de todo esto, el cubeto de retención de los tanques de benceno tiene una altura de 0,75 m (véase **Apartado 10.3.** del **Anexo 10**).



## CAPÍTULO 17: Diseño del sistema de tuberías y accesorios

En el presente capítulo se llevará a cabo el diseño del sistema de tuberías de la línea de proceso. Este diseño consiste en diámetro de todas las conducciones, su espesor, material y la caída de presión que va a experimentar el fluido a lo largo de éstas. Además, se comentará el material que se utilizará para el aislamiento térmico de las tuberías, indicando el espesor requerido en función de la temperatura del fluido que circula por las tuberías.

Se comentará también los accesorios y válvulas que se requieren en la línea de proceso y en las líneas auxiliares de refrigeración y calefacción.

### 17.1. Diseño de tuberías

La adecuada elección del tipo de tuberías a emplear depende de los siguientes factores (Megyesy E.F., 2001):

- Tiempo de vida útil.
- Periodos de mantenimiento.
- Esfuerzo a las temperaturas de trabajo.
- Facilidad de instalación y reparación.
- Adecuada resistencia a la corrosión y erosión.
- Coste de los equipos.

Las conducciones del presente Proyecto han sido diseñadas de acuerdo a la norma ANSI B31.3 del código B31 ("Code for Pressure Piping") patrocinado por ASME, que es el código de diseño más extendido para el diseño de tuberías.

En tuberías de acero, los diámetros normalizados están comprendidos en el intervalo de 1/8 a 30 pulgadas. Para tuberías de 1/8 a 12 pulgadas, ambas inclusive, el diámetro exterior es algo superior al diámetro nominal, mientras que para tuberías de 14 pulgadas y mayores, el diámetro exterior es idéntico al nominal. La línea de proceso dispone de conducciones con diámetros nominales comprendidos entre 0,25 y 20 pulgadas.

El espesor de pared de las tuberías viene expresado en términos del número de lista ("Schedule" o cédula), el cual lleva asociado un valor determinado de espesor según el diámetro nominal. Se utiliza un total de trece números, aunque generalmente, para una tubería de un tamaño determinado únicamente están disponibles algunos de ellos (a excepción de las de mayor tamaño). Las tuberías de la línea de proceso pequeñas presentan "Schedule" entre 10S y 40S, las grandes no poseen este tipo de denominación.

La caída de presión a lo largo del sistema de tuberías se ha calculado mediante la fórmula de Darcy-Weisbach. Para ver todos los cálculos de diámetros, velocidades, espesores y pérdidas de carga, véase el **Anexo 11**.

En la siguiente tabla se representan las conducciones y diámetros utilizados para su construcción y las pérdidas de carga asociadas a ellas (en las conducciones auxiliares o en las que no intervienen en la línea de proceso (agua de mezclado y salida de gases a antorcha) no se han calculado las pérdidas de carga).

**Tabla 17.1.**  
Características de las conducciones de proceso

Conducción	Diámetro nominal (in)	Diámetro externo (in)	Espesor (in)	Velocidad (m/s)	Pérdidas de carga (atm)
C-01	0,75	1,050	0,113	1,155	0,176
C-02	18	17,500	0,250	26,560	≈ 0
C-03	20	19,500	0,250	30,677	0,005
C-04	20	19,500	0,250	30,677	0,003
C-05	20	19,500	0,250	30,677	≈ 0
C-06	20	19,500	0,250	26,034	0,001
C-07	20	19,500	0,250	26,034	0,001
C-08	18	17,500	0,250	25,503	0,001
C-09	16	15,500	0,250	29,045	0,005
C-10	1,25	1,660	0,100	1,225	0,011
C-11	1,25	1,660	0,100	1,225	0,017
C-12	1	1,315	0,109	1,086	0,009
C-13	1	1,315	0,109	1,086	0,032
C-14	0,25	0,540	0,088	0,840	-
C-15	1	1,315	0,109	1,086	0,016
C-16	1	1,315	0,109	1,086	0,009
C-17	1	1,315	0,109	1,086	0,024
C-18	0,5	0,840	0,109	1,325	-
C-19	1	1,315	0,109	1,398	0,413
C-20	2,5	2,875	0,120	26,246	-

El material de las conducciones dependerá del fluido que circule por ellas. Así se usará Acero Carpenter 20 Mo-6 para todas aquellas conducciones por las que circule formaldehído, y en el resto de conducciones se usará acero inoxidable AISI 316L, un tipo de acero de alta resistencia, correspondiente al acero SA-240 según designación por el Código ASME.

El acero Carpentier 20 Mo-6 está especialmente recomendado para conducciones que transporten formaldehído, y el acero SA-240 es un material adecuado a efectos de la corrosión que se pueda producir a altas temperaturas y resiste bien corrientes con metanol.

Como material de aislamiento, como se comentó en otros equipos, se usará lana de roca recubierta con chapa de aluminio. Se usará en aquellas conducciones donde la temperatura sea mayor a 65 °C.

### **17.2. Accesorios**

Las conducciones que se instalarán en la planta poseerán tramos rectos de tuberías como accesorios que permitirán cambiar la dirección del flujo, unir tramos de tuberías, bifurcar o unir corrientes o regular y/o cortar el paso de fluido por la conducción.

Para cambiar la dirección del flujo se usarán codos que son accesorios que se fabrican en diferentes ángulos (generalmente de 90° de 45°), y dependiendo de la longitud del codo (es decir, cuanto mayor longitud, menos brusca será el cambio en la dirección del flujo) se denominan largos o cortos. En la planta en estudio se usarán codos de 90° y todos serán codos largos con el fin de suavizar los efectos que la corrosión y la erosión pueden producir en la zona en la que se produce la torsión del accesorio.

Para bifurcar o unir corrientes se usarán té (la cual posee tres salidas: una de entrada y dos de salida, o dos de entrada y una de salida). En el proceso se usarán dos té, una para la bifurcación de la corriente C-11 y otra para unir la corriente C-13 con la C-14.

Las uniones entre los tramos de las tuberías, y entre las tuberías y los equipos, se realizarán mediante bridas, y entre las tuberías y los elementos de instrumentación mediante uniones roscadas. Las bridas son un par de discos iguales o anillos de metal unidos entre sí mediante tornillos que comprimen la junta situada entre sus caras, permitiendo la conexión entre tramos de tubería o de la tubería con algún otro elemento. La ventaja que presentan las uniones bridadas frente a las uniones soldadas es que, al no ser herméticas, facilitan las labores de mantenimiento en la red de tuberías y la sustitución de las mismas

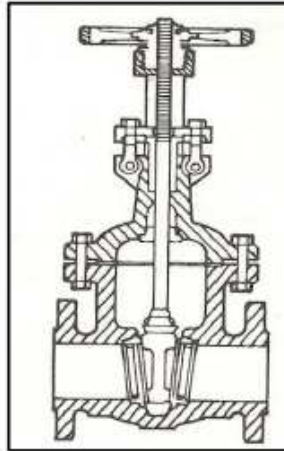
Por último se usarán válvulas para diferentes aplicaciones:

- Impedir o permitir totalmente la circulación de un fluido a través de una conducción.
- Regular la circulación de un fluido a través de conducciones.
- Aliviar la presión registrada en el equipo en el caso de que esta sea superior a la recomendada para su diseño. Este dispositivo recibe el nombre de válvula de seguridad y alivio de presión.

Así, para impedir o permitir totalmente la circulación de un fluido a través de una conducción se usarán válvulas de compuerta. Este tipo de válvula está especialmente diseñado para abrir o cerrar completamente una conducción evitando con ello el paso del fluido. El órgano de cierre es un disco perpendicular a la dirección de flujo, que se mueve verticalmente, sin girar, bajo la acción de un husillo. El disco tiene forma de cuña y se adapta a un asiento que presenta la misma forma.

En la línea de proceso se usarán cuatro válvulas de compuerta por cada pareja de bombas y pareja de ventiladores (se usarán para evitar que el líquido o el gas circule por esa conducción

cuando la bomba o ventilador está parado, evitando así fugas cuando existan paradas o revisiones de mantenimiento). Su accionamiento será manual.

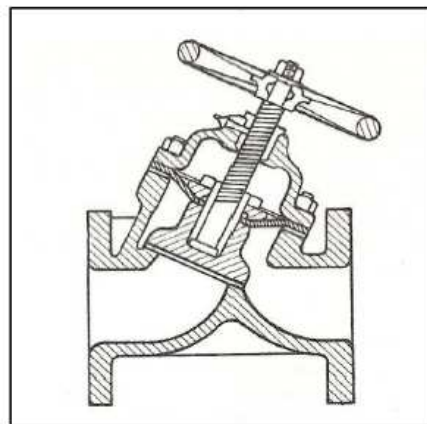


**Figura 17.1.**

Válvula de compuerta (Greene, Richard, W., 1987)

Para regular el paso de fluido se usarán las válvulas de globo, que son, por excelencia, el dispositivo más empleado para regular el caudal de paso de un fluido. Son especialmente adecuadas para producir estrangulamiento debido a la resistencia que presenta ante el flujo. La caída de presión en estos sistemas suele ser grande por lo que para minimizarla se emplean válvulas de globo en Y y en ángulo.

Este tipo de válvula estará presente en la mayoría de los lazos de control de la línea de producción (excepto en el lazo de relación de la alimentación al proceso).



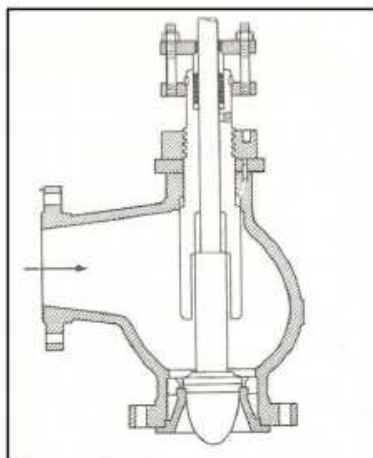
**Figura 17.2.**

Válvula de globo (Greene, Richard, W., 1987)

Para el alivio de presión se emplearán tanto válvulas de reducción como discos de ruptura.

Las válvulas de reducción se encargan automáticamente del alivio de presión y se encargan además de reducir la velocidad del fluido. Disponen de un orificio en la salida para disminuir los daños que la corriente de descarga puede producir en el cuerpo de la válvula.

Este tipo de válvula está presente en la tubería de entrada al reactor, para reducir la presión del fluido para adaptarse a la propia de operación en el interior del equipo.

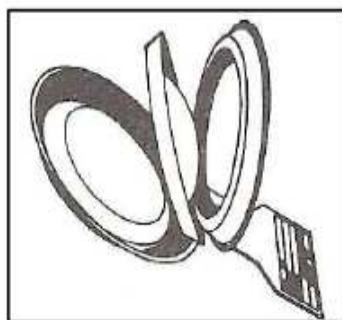


**Figura 17.3.**

Válvula de reducción (Greene, Richard, W., 1987)

Los discos de ruptura son dispositivos adicionales de las válvulas de seguridad que se conectan en paralelo con ésta para aumentar una capacidad adicional al sistema para trabajar en condiciones de operación extremas a la vez que protege el sistema frente a posibles aumentos de presión.

Consiste en un sujetador y un disco metálico destinado a romperse o fracturarse a la presión de desahogo. La válvula de reducción empleada traerá incorporado el disco de ruptura.



**Figura 17.4.**

Disco de ruptura (Greene, Richard, W., 1987)

El material que compondrá el cuerpo y las partes internas de las distintas válvulas empleadas en el proceso es el acero inoxidable SA-240 excepto las válvulas que se encuentren en contacto con formaldehído, las cuales deberán estar realizadas en acero Carpentier 20 Mo-6. Por tanto, las válvulas que deberán ser de Acero Carpentier 20 Mo-6 serán las válvulas de compuerta de la pareja de ventiladores V-02, y de las parejas de bombas B-01, B-02 y B-03. El resto de válvulas serán, como se comentó anteriormente, de acero SA-240.

A continuación se presenta una tabla resumen con los accesorios empleados en la línea de producción diseñada.

**Tabla 17.2.**

Accesorios que se emplean en la línea de proceso

<b>Accesorio</b>	<b>Nº de elementos</b>
Codos de 90° largos	15
Tés	2
Válvulas de compuerta	28
Válvulas de globo	7
Válvulas de reducción con disco de ruptura	1

## CAPÍTULO 18: Diseño del sistema de impulsión

En el presente capítulo se llevará a cabo el diseño de los sistemas de impulsión (bombas y soplantes).

### 18.1. Bombas

Las bombas son los equipos destinados a la impulsión de líquidos. Existen dos tipos básicos de bombas que se diferencian básicamente en la forma en que dicha impulsión se produce:

- Bombas de desplazamiento positivo: estas bombas funcionan a través del uso de un pistón que impulsa el líquido. Así, el líquido es aspirado y entra en una cámara donde un pistón lo empuja hacia fuera otorgándole gran cantidad de altura neta de impulsión (o presión). Debido a esta característica, el caudal que proporciona es pulsante (no es continuo), y los caudales de líquido que puede impulsar suelen ser menores que los de las bombas centrífugas.
- Bombas centrífugas: estas bombas actúan por el empleo de una fuerza centrífuga. Así, el líquido es aspirado entrando una carcasa, y un rodete impulsa el fluido otorgándole altura neta de impulsión. Como diferencias frente a las bombas de desplazamiento positivo se encuentran que el caudal que impulsa es continuo, pueden trabajar con caudales más elevados, pero la altura neta de impulsión que aporta suele ser menor.

Debido a las características de caudales de líquidos y alturas netas de impulsión las bombas empleadas en el proceso deben ser del tipo centrífugas (véase **Apartado 12.1.** del **Anexo 12**).

Las bombas centrífugas son el tipo de bombas que más se emplea a nivel industrial debido a proporcionar caudales constantes, poder operar con grandes caudales de líquido, a su gran versatilidad, bajo coste, diseño, operación y mantenimiento sencillos.

Las bombas centrífugas constan de las siguientes partes:

- Tubería de aspiración la cual concluye prácticamente en la brida de aspiración.
- El rodete o impulsor, formado por una serie de álabes que giran dentro de una carcasa circular. El rodete se encuentra unido al eje y es la parte móvil de la bomba. El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta el centro del rodete que es accionado por un motor, experimentando un cambio de dirección y absorbiendo un trabajo. Los álabes del rodete someten a las partículas de líquido a un movimiento de rotación muy rápido siendo proyectadas hacia el exterior por acción de la fuerza centrífuga. De esta forma abandonan el rodete dirigiéndose hacia la carcasa y siendo evacuadas hacia la tubería de impulsión.

- La carcasa o voluta está dispuesta en forma de caracol de tal manera que la separación entre la carcasa y el rodete es mínima en la parte superior y va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión. De esta forma aumenta la presión del líquido a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta.
- Tubería de impulsión.

En la línea de proceso que se diseña en el Presente Proyecto Fin de Carrera se requiere la implantación de cuatro bombas, pero se suelen colocar en parejas para que si ocurre alguna avería o problema en la bomba, se pueda operar con la otra para que el proceso de producción no se detenga. El funcionamiento de la pareja de bomba es alternativo. Por tanto se necesitarán ocho bombas en total para la impulsión de los fluidos que intervienen en el proceso.

La primera pareja (bomba B-01) de ellas es la encargada de impulsar el caudal parcial de líquido de salida del absorbedor A-01 que se va a recircular, hasta la cúspide de la torre de absorción para que este líquido absorba el formaldehído que entra gaseoso en la columna.

La segunda pareja de bombas (bomba B-02) es la encargada de impulsar el caudal parcial de líquido de salida del absorbedor A-01 que se va a adecuar para obtener el producto final, hasta el mezclador M-01 donde alcanzará la concentración de formaldehído deseada.

La tercera pareja de bombas (bomba B-03) es la encargada de impulsar el caudal de salida del mezclador M-01 al depósito Rundown, del cual se enviará el producto ya final a los depósitos de almacenamiento para su posterior recogido y/o transporte.

La última pareja de bomba, que es la que se encuentra al principio del proceso (bomba B-04), es la encargada de la descarga de la alimentación de metanol de los tanques de almacenamiento para llevarlo al intercambiador de calor IC-01, y a partir de ahí se dará el proceso. Se ha otorgado el nombre de B-04 a esta bomba a pesar de encontrarse al comienzo de la planta, debido a que es una bomba “de transición”, es decir, puede pertenecer tanto al Proyecto Fin de Carrera “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural**”, como del presente Proyecto Fin de Carrera (“**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol**”).

Para la selección de las bombas en el proceso se ha tenido en cuenta, además del tipo de bomba que se ha obtenido gráficamente gracias a los valores de altura neta de impulsión y caudal que se desea impulsar, de estos mismos parámetros descritos anteriormente, de las características del proceso (tipo de líquidos, temperatura de operación, etc.) y de la altura neta de succión requerida. Así se ha escogido un modelo de bomba de la marca Liquiflo que cumple todas las características necesarias y que funcionará correctamente debido a que la altura de succión positiva requerida,  $NPSH_r$ , es inferior a la altura de succión neta positiva disponible,  $NPSH_d$  determinada para cada uno de estos cuatro equipos. Este modelo de bomba cumple las



características de las cuatro bombas que posee la planta, por lo que se usará el mismo modelo en las cuatro. Los cálculos correspondientes a cada una de estas unidades se encuentran recogidos en el **Anexo 12** del presente Proyecto Fin de Carrera. Las características propias pueden consultarse en el catálogo comercial de cada una de estas unidades en el **Anexo 14**.

A continuación se expondrán las características de cada bomba:

**Tabla 18.1.**  
Características de las bombas de proceso

Nombre	Bomba B-01	Bomba B-02	Bomba B-03	Bomba B-04
Altura útil (m)	3,82	3,82	6,91	4,29
Caudal (kg/s)	0,53	0,53	0,789	0,317
Potencia (W)	25	25	70	20
NPSH <sub>r</sub> (m)	0,53	0,53	0,69	0,30
NPSH <sub>d</sub> (m)	14,46	14,46	10,77	10,81

## 18.2. Soplantes

Los principios en los que se basan los equipos de bombeo de líquidos son los mismos que los del equipo de impulsión de gases, aunque los detalles constructivos de ambos pueden ser muy distintos. La diferencia fundamental entre la impulsión de un líquido y un gas reside en que los gases son fluidos compresibles, por lo que existe la posibilidad de reducir el volumen de este último por compresión, a costa de aumentar su densidad, fenómeno que no se puede dar en el caso de la impulsión de líquidos al ser fluido prácticamente incompresibles.

Los equipos destinados a la impulsión de gases suelen clasificarse en tres grupos en función a la presión de descarga y la magnitud del caudal de impulsión en:

- Ventiladores: presiones de descarga inferiores a 2 bar y altos caudales de impulsión. La diferencia de presión sufrida por el fluido durante el proceso es pequeña.
- Soplantes: presiones de descarga de hasta 2 bar con respecto a la de carga para altos volúmenes de gas.
- Compresores: permiten elevar la presión de grandes volúmenes de gases en un rango de 10-1000 veces con respecto a la existente en el punto de carga.

Todas las corrientes que se requieren impulsar en la línea de proceso diseñada exigen aumentar la presión en un valor menor a 2 bar, por lo que los equipos elegidos para la impulsión son ventiladores. Debido a que los ventiladores de alta presión (presiones de descarga mayores a 0,1 bar con respecto a la de aspiración) suelen ser bastante exclusivos, a que su uso no está muy extendido y a que no existen muchas empresas que diseñen este tipo de ventiladores, se usarán soplantes de baja presión (recuérdese que estos criterios de selección de los equipos de impulsión de gases son muy variables, encontrándose en diferentes publicaciones criterios distintos). Aunque se empleen soplantes en vez de ventiladores, se usará la notación V-01 (para el ventilador 1 por ejemplo) debido a si se desea

en algún momento cambiar los soplantes por ventiladores de alta presión que cumplan con las características necesarias y a que el comportamiento de los soplantes que se van a instalar es casi idéntico al de un ventilador.

En la línea de proceso que se diseña en el Presente Proyecto Fin de Carrera se requiere la implantación de cuatro ventiladores, pero se suelen colocar en parejas debido a las mismas razones que se comentaron en las bombas. El funcionamiento de la pareja de ventiladores es alternativo. Por tanto se necesitarán ocho ventiladores en total para la impulsión de los fluidos que intervienen en el proceso.

La primera pareja (ventilador V-01) es la encargada de impulsar el caudal proveniente del intercambiador IC-02 y llevarlo hasta el reactor R-01 donde se producirá la reacción química entre el oxígeno y el metanol.

La segunda pareja de ventiladores (ventilador V-02) es la encargada de impulsar el caudal de salida del reactor R-01 y llevarlo al intercambiador de calor IC-01, donde este caudal se enfriará.

La última pareja de ventiladores, que es la que se encuentra al principio del proceso (ventilador V-03), es la encargada de la aspiración del aire atmosférico que va a intervenir en el proceso. Se ha otorgado el nombre de V-03 a este ventilador debido a que es un equipo que no se encuentra dentro del proceso, sino que se podría considera casi auxiliar (aunque es imprescindible y muy importante).

Debido a que los aumentos de presión son los correspondientes a los ventiladores, y que en los ventiladores se supone que la densidad no varía, se usarán ecuaciones de diseño de los ventiladores.

La selección de los soplantes viene determinada, al igual que ocurría con las bombas, del caudal que se desea impulsar y al aumento de presión necesario, y a otra serie de características (características del fluido, la temperatura de operación, etc.).

Se ha escogido un modelo de soplante de la marca Aerzen que cumple con todas las características necesarias de todos los ventiladores de la planta. El cálculo de todas las características de los soplantes se encuentra en el **Anexo 12**, encontrándose las especificaciones técnicas del modelo escogido en el **Anexo 14**.

A continuación se expondrán las características de cada soplante:

**Tabla 18.2.**  
Características de los soplantes de proceso

Nombre	Ventilador V-01	Ventilador V-02	Ventilador V-03
Diferencia de Presión (atm)	0,108	0,121	0,15
Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	5,914	5,019	4,124
Potencia (W)	7800	7400	7600

## CAPÍTULO 19: Control e Instrumentación

En todo proceso industrial es imprescindible controlar una serie de variables para el correcto funcionamiento de los equipos. Si esto no se lleva a cabo puede ocurrir desde que los equipos operen mal o que el producto final no posea las características deseadas, hasta llegar a provocar accidentes. Por ello es una parte fundamental del diseño de plantas industriales.

Existen multitud de definiciones que intentan describir qué es el control de procesos, aquí se expondrán algunas de ellas:

“La sustitución o ayuda del esfuerzo mental del hombre en la fabricación de un producto” (Thomas, 1969)

“Control automático de la fabricación de un producto a través de varias etapas con el uso libre de maquinaria para ahorrar trabajo manual y esfuerzo mental” (Diccionario inglés de Oxford)

El objetivo fundamental del control de procesos es mantener una variable en un valor fijo establecido modificando otras variables del proceso. Existen variables imposibles de modificar que se denominan perturbaciones (como la temperatura y la presión ambiental, las vibraciones del suelo, etc.), pero existen otras, denominadas variables manipulables, las cuales pueden ser modificadas.

Conforme ha pasado el tiempo el control de procesos se ha ido perfeccionando y modernizando debido a los avances tecnológicos y al aumento de la oferta de los dispositivos de control. Así se ha pasado del control manual a control distribuido y otra serie de controles más innovadores.

El empleo del control de procesos se usa con una serie de objetivos:

- Mejorar la productividad generando productos competitivos y de alto rendimiento.
- Mantener la calidad tanto del proceso como de los productos dentro de las especificaciones de fabricación.
- Cumplir las expectativas de producción disponiendo de las cantidades necesarias en el momento preciso.
- Aumentar la flexibilidad del sistema productivo, adaptándolo a los cambios en la producción, e intentar que la influencia a los agentes externos sobre el proceso sea mínima.
- Asegurar la estabilidad del proceso químico y optimizarlo.

El empleo de un control de proceso en una planta aporta una serie de ventajas:

- Ahorro energético

- Control de calidad
- Seguridad
- Optimización del proceso
- Mejoras medioambientales
- No requiere supervisión
- Optimización de las materias primas

A continuación se expondrá el control de procesos aplicado a la línea de proceso que se estudia en el presente Proyecto Fin de Carrera.

### 19.1. Variables de operación

Las variables más usuales que se controlan en los procesos químicos son la temperatura, la presión, el caudal y el nivel. Debido a que en nuestra planta las presiones a las que se opera son prácticamente la presión atmosférica, y los procesos no se ven demasiado alterados por una pequeña subida o bajada de la presión, no se usará el control de la presión en ningún punto de la planta. Por tanto las variables que se van a controlar en este proceso van a ser:

**Temperatura:** la temperatura es la magnitud que expresa la energía cinética de los átomos o moléculas de la sustancia en cuestión, y macroscópicamente expresa lo frío o caliente que está un cuerpo. Es una magnitud de vital importancia para todos los procesos en los que intervenga un cambio de temperatura o con generación o consumo de energía (como en las reacciones químicas).

**Caudal:** el caudal es la magnitud que expresa la cantidad de sustancia que circula por una conducción por unidad de tiempo. Se expresa de diferentes manera, caudal másico, volumétrico o molar.

**Nivel:** el nivel es la altura que alcanza un líquido en un recipiente. Es muy importante porque si es muy pequeño puede ocasionar problemas en las unidades que dependan del depósito, y si es muy grande se pueden producir derrames.

### 19.2. Lazos de control en la planta

La planta se va a dividir en dos secciones para su estudio con más detenimiento. La primera sección será la comprendida desde el depósito de metanol hasta la línea 10 (la corriente de impulsión del ventilador V-03 que se dirige hacia la columna de absorción) y se denominará **Sección de Reacción**, y la segunda sección será la comprendida entre la línea 10 y el depósito Rundown de formaldehído al 37%, la cual será denominada **Sección de Acondicionamiento**.

Además de todos los lazos que se expondrán en los diagramas y que se explicarán posteriormente, en la mayoría de las líneas se ubicarán sensores e indicadores para comprobar el buen funcionamiento de los equipos. Así se colocarán sensores e indicadores de caudal, temperatura y de composición (en las corrientes de líquido se puede usar un densímetro para determinar esta magnitud).

Estos sensores enviarán los datos recogidos a la sala de control, la cual supervisará el buen funcionamiento de la planta gracias a estos valores y a la de los demás sensores (los que se encuentran en los lazos). Los indicadores servirán para que los operarios, si existe una avería o alguna desviación en las condiciones de operación, puedan deducir con los datos que les muestran los indicadores, el origen del problema y poder así solucionarlo.

En los diagramas que se expondrán se verán diagramas simplificados, es decir, solo se expondrán los lazos con sus sensores, controladores y válvulas, el resto de los equipos se han obviado. Pero en la realidad esos equipos son imprescindibles para el funcionamiento de los lazos de control (estos equipos son convertidores intensidad-presión, otro tipo de convertidores, transmisores, etc.).

A continuación se explicarán los lazos que se van a usar en la planta:

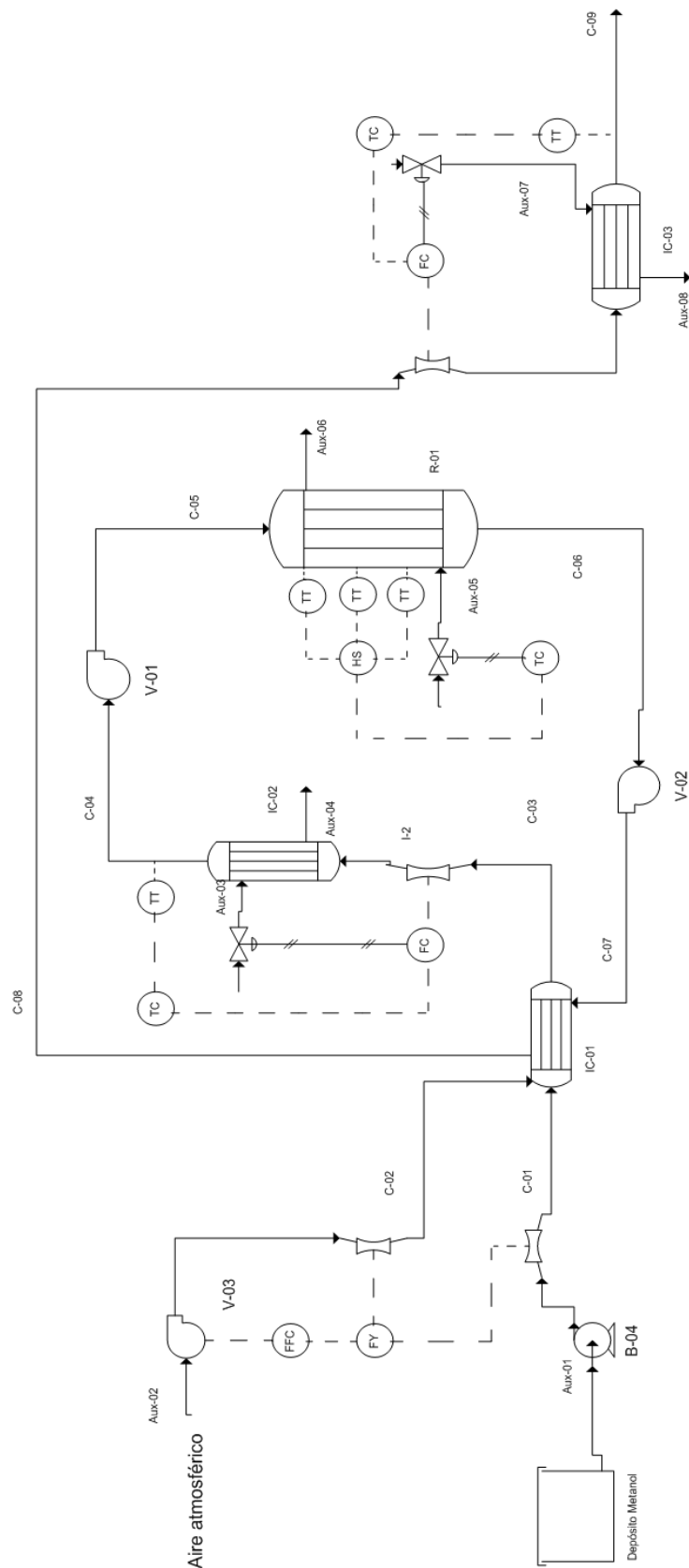
**Lazo cerrado:** el lazo cerrado consiste en un sensor que mide la magnitud que deseamos que se mantenga constante, y envía el dato que ha obtenido a un controlador que compara ese valor con uno de referencia ("set point"). Dependiendo de la diferencia entre el valor del sensor y el valor requerido, el controlador mandará una señal a un dispositivo (generalmente válvula, aunque también se puede usar una bomba, ventilador o compresor) que modificará otra variable del proceso. Esta variable repercutirá en la variable que se deseaba controlar para que vuelva a tener el valor deseado.

**Lazo en cascada:** el lazo en cascada consiste en dos lazos cerrados. Un sensor mide la magnitud que deseamos que se mantenga constante (variable 1) y la envía a un controlador. Otro sensor envía el valor de otra variable (variable 2) que influye en la variable 1, a un controlador. El primer controlador envía una señal al segundo controlador, la cual converge con la señal enviada por el segundo sensor (valor de la variable 2). Este controlador, con ambos valores recibidos mandará una señal a un dispositivo que modificará la variable 3 (puede ser la variable 2 u otra distinta), la cual repercutirá en la variable 1, que es la que se desea controlar.

**Lazo de relación:** el lazo de relación se usa para que dos corrientes mantengan una relación de caudales (generalmente). Así existen dos sensores que miden cada una de las variables, y esos valores convergen en un equipo que envía una señal (ese quipo mediante una fórmula que relaciona ambas variables obtiene la señal que debe enviar) a un controlador. Este controlador es el que ordena actuar a un dispositivo que modificará una de las variables anteriores.

**Control selectivo:** este control se basa en varios sensores que miden una variable a controlar en distintos puntos de un equipo o línea. Estos sensores envían los valores obtenidos a un selector, el cual escoge el valor más alto o el más bajo de todos ellos. Este selector envía la señal correspondiente a ese valor escogido a un controlador, el cual, gracias a este valor, ordena actuar a un dispositivo para que modifique una variable para que repercuta en la variable a controlar.

19.2.1. Control en la Sección de Reacción



Como se puede observar en la figura anterior, existen cuatro lazos en esta sección. Se expondrán ahora cada uno de ellos:

**Lazo de relación de la alimentación:**

En este lazo un sensor de caudal mide el caudal de la corriente C-01 y otro sensor mide el caudal de la corriente C-02. Ambos mandan una señal a un equipo de relación, y éste manda una señal a un controlador. Si la relación entre ambas corrientes no es la adecuada, el controlador ordena al ventilador V-01 que aumente o disminuya sus revoluciones, aumentando o reduciendo así el caudal de la corriente C-02.

**Lazo en cascada del intercambiador IC-02:**

En este lazo un sensor de temperatura mide la temperatura de la corriente de salida que va por tubos del intercambiador (corriente C-04), y envía una señal a un controlador de temperatura. A su vez un sensor de caudal mide el caudal de entrada de esa corriente (corriente C-03) y envía su señal a un controlador de caudal. El controlador de temperatura le envía también una señal al controlador de caudal, y éste, cuando ha recibido las señales, las compara con su set point. Si no coincide, le ordenará a la válvula que se encuentra en la corriente Aux-03 que actúe cerrándose o abriéndose para permitir mayor o menor paso de fluido calentador.

Así, si el caudal de la corriente C-03 varía sin que se modifique el valor de la temperatura de la corriente C-04, el controlador puede hacer que la válvula actúe para prevenir que la temperatura de la corriente C-04 varíe a posteriori.

**Control selectivo del reactor R-01:**

El reactor es importante que opere de la manera más isotérmicamente posible, pero es preferible que opere a menor temperatura que a temperaturas superiores a la esperada (a mayores temperaturas se obtiene menor rendimiento debido a ser una reacción exotérmica (a pesar de que las constantes de reacción sean mayores a mayor temperatura), además de que existe mayor riesgo de fugas y de explosión).

En este control existen varios medidores de temperatura a lo largo del reactor, los cuales le envía su medida a un selector de alta. Este selector envía el valor más alto de los que le han enviado los sensores al controlador, que observando si este valor es el adecuado o no, le ordenará a la válvula que se encuentra en la corriente Aux-05 que se abra o cierre para permitir menor o mayor caudal de refrigerante.

Generalmente el valor mayor de temperatura que se obtendrá en el reactor será al comienzo de éste al ser la concentración de los reactivos las más alta, y por tanto la reacción es más rápida.

### Lazo en cascada del intercambiador IC-03:

En este lazo un sensor de temperatura mide la temperatura de la corriente de salida que va por tubos del intercambiador (corriente C-09), y envía una señal a un controlador de temperatura. A su vez un sensor de caudal mide el caudal de entrada de esa corriente (corriente C-08) y envía su señal a un controlador de caudal. El controlador de temperatura le envía también una señal al controlador de caudal, y éste, cuando ha recibido las señales, las compara con su set point. Si no coincide, le ordenará a la válvula que se encuentra en la corriente Aux-07 que actúe cerrándose o abriéndose para permitir mayor o menor paso de fluido calentador.

Así, si el caudal de la corriente C-08 varía sin que se modifique el valor de la temperatura de la corriente C-09, el controlador puede hacer que la válvula actúe para prevenir que la temperatura de la corriente C-09 varíe a posteriori.

En todos estos lazos se usarán, además de los sensores, controladores y demás aparatos nombrados, convertidores intensidad-presión para accionar las válvulas (en el lazo de relación de la alimentación no hace falta debido a que no se tiene válvula, sino un ventilador), transmisores de señal, indicadores, etc. En el caso del lazo de temperatura del reactor, se tendrá una alarma ante posibles subidas súbitas de temperatura.

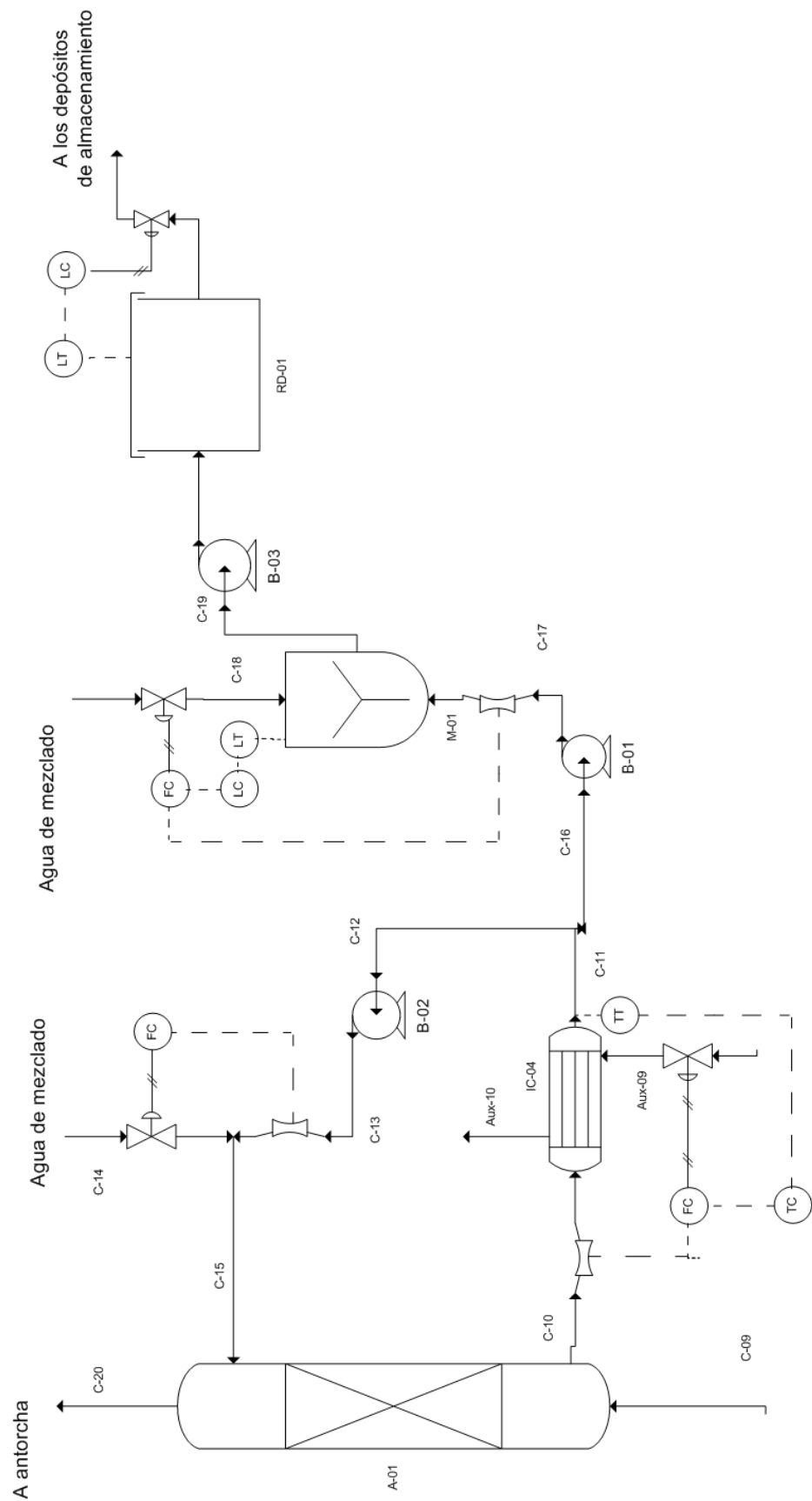
A continuación se expondrá una tabla con los controles usados:

**Tabla 19.1.**  
Lazos de control en la Sección de Reacción

Lazo de control	Variable controlada	Variable Manipulada	Equipo	Set Point
Lazo de relación	Relación entre caudales de alimentación	Caudal de la corriente C-02	Corrientes de alimentación	10,765 mol <sub>aire</sub> /mol <sub>metanol</sub>
Lazo en cascada	Temperatura de la corriente C-04	Caudal de la corriente Aux-03	Intercambiador IC-02	570 K
Control selectivo	Temperatura en el reactor	Caudal de la corriente Aux-05	Reactor R-01	570 K
Lazo en cascada	Temperatura de la corriente C-09	Caudal de la corriente Aux-07	Intercambiador IC-03	310 K



19.2.2. Control en la Sección de Acondicionamiento



Como se puede observar en la figura anterior, existen cuatro lazos en esta sección. Se expondrán ahora cada uno de ellos:

#### **Lazo en cascada del intercambiador IC-03:**

En este lazo un sensor de temperatura mide la temperatura de la corriente de salida que va por tubos del intercambiador (corriente C-11), y envía una señal a un controlador de temperatura. A su vez un sensor de caudal mide el caudal de entrada de esa corriente (corriente C-10) y envía su señal a un controlador de caudal. El controlador de temperatura le envía también una señal al controlador de caudal, y éste, cuando ha recibido las señales, las compara con su set point. Si no coincide, le ordenará a la válvula que se encuentra en la corriente Aux-09 que actúe cerrándose o abriéndose para permitir mayor o menor paso de fluido calentador.

Así, si el caudal de la corriente C-10 varía sin que se modifique el valor de la temperatura de la corriente C-11, el controlador puede hacer que la válvula actúe para prevenir que la temperatura de la corriente C-11 varíe a posteriori.

#### **Lazo cerrado en el punto de mezcla:**

En este lazo un sensor de caudal mide el caudal de la corriente C-13, enviando la señal de salida a un controlador. Éste ordena a la válvula que abra o cierre para que el caudal de la corriente C-14 aumente o disminuya, y así la relación entre ambos caudales sea la misma.

#### **Lazo en cascada del mezclador M-01:**

En este lazo un sensor de nivel mide la altura del líquido en el mezclador y envía una señal a un controlador de nivel. A su vez un sensor de caudal mide el caudal de entrada de la corriente C-17 y envía su señal a un controlador de caudal. El controlador de nivel le envía también una señal al controlador de caudal, y éste, cuando ha recibido las señales, las compara con su set point. Si no coincide, le ordenará a la válvula que se encuentra en la corriente C-18 que actúe cerrándose o abriéndose para permitir mayor o menor paso de agua al mezclador.

Así, si el caudal de la corriente C-17 varía sin que se modifique el valor del nivel en el mezclador, el controlador puede hacer que la válvula actúe para prevenir que el nivel varíe a posteriori.

Este control está instalado para que no entre aire en la bomba, provocando que cavite.

#### **Lazo cerrado del depósito “Rundown”:**

En este lazo un sensor de nivel mide la altura del líquido en el depósito Rundown, enviando la señal de salida a un controlador. Éste ordena a la válvula que abra o cierre para que el caudal de la corriente final que se dirige a los depósitos finales de producto aumente o disminuya, y así el nivel del depósito baje o suba.

En todos estos lazos se usarán, además de los sensores, controladores y demás aparatos nombrados, convertidores intensidad-presión para accionar las válvulas, transmisores de señal, indicadores, etc.

Además de estos lazos de control, cada depósito de producto poseerá un lazo de control similar al del depósito Rundown pero con un set point del 50% de llenado.

A continuación se expondrá una tabla con los controles usados:

**Tabla 19.2.**  
Lazos de control en la Sección de Acondicionamiento

Lazo de control	Variable controlada	Variable Manipulada	Equipo	Set Point
Lazo en cascada	Temperatura de la corriente C-11	Caudal de la corriente Aux-09	Intercambiador IC-04	310 K
Lazo cerrado	Relación de caudales en el punto de mezcla	Caudal de la corriente C-14	Corrientes del punto de mezcla	$0,106 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{CH}_2\text{O}}$
Lazo en cascada	Nivel de líquido en el mezclador	Caudal de la corriente C-18	Mezclador M-01	Lleno al 90%
Lazo cerrado	Nivel de líquido en el depósito	Caudal de la corriente final	Depósito Rundown	Lleno al 90%

### 19.2.3. Instrumentación

Ya obtenidos los lazos de control se debe conocer los instrumentos que se deben adquirir para poder llevarlos a cabo. Se expondrán a continuación los instrumentos usados:

- **Sensores de temperatura:** se usará un sensor tipo termopar para todos los lazos en los que intervenga la temperatura: se usarán 5 sensores en el control selectivo al reactor, 3 en los lazos en cascada a los intercambiadores (uno por cada lazo) y se emplearán 4 sensores en diferentes puntos estratégicos de la planta para enviar los datos a la sala de control (los puntos serían la salida del fluido que va por tubos del intercambiador IC-01 (corriente C-03), la salida del reactor R-01 (corriente C-06), la salida del fluido que va por carcasa del intercambiador IC-01 (corriente C-08) y la salida del líquido de la columna de absorción (corriente C-10)).

El modelo elegido es un sensor de la marca RS con un rango de temperaturas de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $400^{\circ}\text{C}$  (223 K a 673 K), rango en las que se encuentran las temperaturas de operación de la planta, y con una exactitud de  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ . Para observar más características véase el **Anexo 14**.

- **Sensores de nivel:** se usarán sensores de nivel en los lazos al mezclador M-01, al depósito Rundown, y a los depósitos de producto final. El sensor escogido es un sensor óptico de la marca Kobold que permite operar a temperaturas menores a 85 °C. Para más características véase el **Anexo 14**.
- **Sensores de caudal:** se usarán sensores de caudal en todos los lazos en los que intervenga el caudal: se usarán 3 sensores en los lazos en cascada de los intercambiadores (uno por cada lazo), 2 por el lazo de relación, uno por el lazo cerrado del punto de mezcla, uno por el lazo en cascada del mezclador, y se usarán 6 en distintas posiciones estratégicas del proceso para enviar los datos a la sala de control (los puntos serán la salida del intercambiador IC-01 (corriente C-05), la entrada al reactor R-01 (corriente C-07), la entrada gaseosa al absorbedor (corriente C-09), la salida gaseosa del absorbedor (corriente C-20), la entrada líquida al absorbedor (corriente C-15) y el caudal de trasvase del mezclador M-01 al depósitos Rundown (corriente C-19).

Para ello se empleará un sensor de área variable de la marca Kobold que puede medir tanto caudales de gases como de líquidos, siendo la temperatura máxima de operación 350°C (623 K, mayor a cualquiera a la que opera la planta), y una exactitud de  $\pm 1,6\%$  para líquidos y  $\pm 1,8\%$  para gases. Los rangos de caudales que puede medir son de 0,5 a 13000 L/h para líquidos y 0,015 a 2400 m<sup>3</sup>/h de gases para gases. Para más características véase el **Anexo 14**.

- **Sensores de composición (densidad):** se usarán sensores de densidad para enviar a la sala de control los datos para observar si existe alguna avería o proceso que está operando mal. Para ello se van a emplear 3 sensores de densidad, uno se colocará en la corriente C-10 (salida líquida del absorbedor), otro en la corriente C-15 (entrada líquida al absorbedor), y el último en el depósito "Rundown".

El sensor que se va emplear es un sensor de la marca "Kobold" que posee un rango de densidades de 700g/L a 1900 g/L de líquido. Para más características véase el **Anexo 14**.

- **Controladores:** se usarán controladores en todos los lazos de control: se emplearán 2 en el lazo de relación (un controlador actuará como el elemento de relación, y el otro como controlador en sí), 6 en los lazos en cascada a los intercambiadores (2 en cada lazo), 2 en el lazo en cascada al mezclador M-01, 2 en los lazos cerrados (uno en cada lazo) y uno en el lazo selectivo del reactor R-01.

El tipo de controlador escogido es uno de la marca ABB. Para observar sus características véase el **Anexo 14**.

- **Selector de alta:** se usará un solo selector en el control selectivo al reactor R-01. Se ha escogido uno de la marca SIL. Para observar sus características véase el **Anexo 14**.

- **Convertidores intensidad/presión:** se usará un convertidor I/P en todos los lazos menos en el lazo de relación, por lo que se necesitarán 7 unidades. Se ha escogido un convertidor I/P de la marca Omega. Para observar sus características véase el **Anexo 14**.

Además de estos instrumentos se usarán válvulas, cableado, etc.

## **CAPÍTULO 20: Seguridad**

En el presente capítulo se expondrá tanto los fundamentos teóricos de la Seguridad Industrial y la Prevención de Riesgos Laborales, como dichas disciplinas de manera aplicada al proceso en estudio.

### **20.1. Fundamentos teóricos de la Seguridad**

El objetivo principal de este estudio consiste en, recoger de forma breve los posibles riesgos que existen en materia de seguridad e higiene en las condiciones de trabajo que se desarrolla el proceso, teniendo en cuenta el personal presente en el mismo, el recinto donde se encuentra ubicado y la población más cercana a la zona donde se encuentra la planta.

El conocimiento de los principales riesgos existentes en el puesto de trabajo y el establecimiento y cumplimiento de las medidas requeridas para la prevención de posibles accidentes constituye el punto de partida principal para el correcto desarrollo del trabajo en todo proceso industrial; siendo este punto clave para la elaboración de un análisis de los riesgos que están presentes o pueden estar en la jornada de trabajo en la línea de proceso, de forma que se tomen las medidas de prevención necesarias para reducir al máximo los riesgos existentes.

#### **20.1.1. Legislación aplicable**

La Legislación aplicable abarca dos campos, los cuales se estudian en conjunto por encontrarse relacionadas entre sí, siendo estos campos:

- Seguridad en el trabajo
- Higiene en el trabajo

La legislación aplicable en materia de seguridad es:

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- Real Decreto 1299/2006, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro. BOE núm. 302 de 19 de diciembre.
- Real Decreto 1995/1978, de 12 de mayo, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la seguridad social.
- Real Decreto 1244/1979, de 4 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Aparatos a Presión.
- Real Decreto 1942/1993, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones de Protección contra Incendios.
- Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad contra Incendios en Establecimientos Industriales.

- Real Decreto 400/1996, de 1 de marzo. Aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.
- Real Decreto 485/1997, de 14 de abril. Disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo. Disposiciones mínimas sobre utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.
- Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban las medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes.
- Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de productos Químicos y sus instrucciones técnicas complementarias.
- Real Decreto 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la seguridad y salud de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.
- Real Decreto de 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.
- Decreto 3151/68, de 28 de noviembre, reglamento de la Línea de Alta tensión.
- Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.
- Reglamento (CE) 1907/2006 del Parlamento Europeo y el Consejo, de 18 de diciembre, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).

La legislación en materia de higiene en el trabajo:

- Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.
- Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.
- Real Decreto 1124/2000, de 16 de Junio, por el que se modifica el Real Decreto 665/1992, de 12 de Mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo (B.O.E. núm. 145 de 17 de Junio de 2000).

#### **20.1.2. Análisis de riesgos y establecimiento de medidas preventivas**

Se da lugar a la identificación de los principales riesgos que existen en la línea de proceso y qué medidas tomar para evitar esos riesgos ó minimizarlos en su mayor medida.

La seguridad es una parte esencial en la industria química. Ésta se centra, además de evitar el siniestro y reparar sus consecuencias en lo posible, también de reducir al mínimo las causas que puedan dar lugar a los accidentes. El objetivo de la industria debe ser continuar mejorando la gestión de los riesgos asociados a su operación, manteniendo el máximo beneficio económico.

La Seguridad en el Trabajo puede definirse como “la técnica no médica de prevención cuya finalidad se centra en la lucha contra los accidentes de trabajo, evitando y controlando sus consecuencias” (Manual Práctico de Prevención de Riesgos Laborales, 2001).

Otros dos conceptos que hay que tener en cuenta son prevención y protección, siendo la prevención las técnicas encaminadas a actuar directamente sobre los riesgos antes de que puedan llegar a materializarse actuando sobre la probabilidad y sobre las consecuencias a la vez. Es una técnica activa de actuación. Mientras que la protección son técnicas activas pero su objetivo fundamental es actuar únicamente sobre las posibles consecuencias bien reduciéndolas o incluso eliminándolas, aunque no realiza ningún tipo de actuación sobre la probabilidad de que se actualice el riesgo.

Los accidentes de trabajo constituyen fenómenos no deseados por las consecuencias que provocan fundamentalmente sobre los trabajadores expuestos a los riesgos laborales, pero también sobre los bienes materiales, la propiedad y el medio ambiente. Para ello se establecen unas técnicas de seguridad, definiéndose estas como el conjunto de actuaciones, sistemas y métodos dirigidos a la detección y corrección de los distintos factores de riesgo que intervienen en los accidentes de trabajo y al control de sus posibles consecuencias.

Estas técnicas están dirigidas a actuar sobre los dos elementos necesarios para que ocurra el accidente: la conjunción del factor técnico y del factor humano. Todo ello mediante adecuados procedimientos de gestión.

Se pueden clasificar las técnicas de seguridad dependiendo de la etapa en la que se actúe en:

- Técnicas analíticas: análisis del riesgo y valoración del riesgo; no evitan el accidente, pero identifican el peligro y valoran el riesgo.
- Técnicas operativas preventivas: control del riesgo; evitan el accidente al eliminar sus causas.
- Técnicas operativas de protección: control del riesgo; no evitan el accidente pero reducen o eliminan el daño.

Según su alcance podemos clasificar las técnicas de seguridad en:

- Técnicas generales: de aplicación universal, válidas para cualquier tipo de riesgo.
- Técnicas específicas: serían las mismas técnicas pero limitadas a riesgos concretos (incendios, explosiones, caídas de altura, etc.) o a ramas de actividad (agricultura, construcción, industria, transporte, minería, pesca).

El ejercicio de una actividad profesional supone un esfuerzo y una necesidad y como cualquier otra tarea, la exposición a unos riesgos que afecta tanto a la salud física, psíquica como social. Las alteraciones del ambiente generadas por el trabajo, desarrollan una serie de factores agresivos para la salud, entre los que destacan:

- Factores mecánicos.
- Agentes físicos.



- Contaminantes químicos.
- Factores biológicos.
- Tensiones psicológicas y sociales.

Para determinar la magnitud de los riesgos que no hayan podido evitarse, se lleva a cabo evaluaciones de riesgos, siendo actualmente la base para la gestión activa de la seguridad y la salud en el trabajo. La *Evaluación de Riesgos Laborales* es “el proceso dirigido a estimar la magnitud de aquellos riesgos que no hayan podido evitarse, obteniendo la información necesaria para que el empresario esté en condiciones de tomar una decisión apropiada sobre la necesidad de adoptar medidas preventivas y, en tal caso, sobre el tipo de medidas que deben adoptarse” (Manual Práctico de Prevención de Riesgos Laborales, 2001).

#### **20.1.2.1. Tipos de riesgos básicos**

Los principales riesgos a los que se está expuesto en una línea de proceso son:

- Riesgo químico.
- Riesgo de incendios.
- Riesgo de explosión.
- Riesgo eléctrico.
- Riesgo en la manipulación de máquinas y herramientas de trabajo.
- Riesgo en línea de producción.

A continuación, se procede a la descripción de estos riesgos y al desarrollo de algunas medidas de seguridad.

- **Riesgo Químico**

Una industria química es el lugar en el que se manipulan y transforman productos químicos, con el objetivo de obtener otros que sirvan de base a otras industrias o bien venderlos directamente como productos acabados. En este caso se entiende por riesgo químico la posibilidad de que se produzca un accidente de origen químico capaz de producir un daño.

Los lugares en que una industria química puede producir daños son básicamente los siguientes:

- Instalaciones de proceso: Son las zonas donde se realizan las transformaciones o reacciones. Normalmente, en el proceso no están involucradas grandes cantidades de sustancias, y el peligro es más interno (industria) que no externo (población). No obstante, el desarrollo de reacciones incontroladas, o de otros sucesos que den lugar a incendios, explosiones o fugas pueden afectar las zonas donde están almacenadas las sustancias y producir accidentes mayores.
- Instalaciones de almacenaje: Son los lugares donde se almacenan, de forma temporal, las sustancias químicas. Aunque la probabilidad es muy baja, en caso de que se produzca un accidente, éste podrá ser de grandes dimensiones, ya que la cantidad de sustancias almacenadas suele ser muy importante.

- **Conducciones:** Hay determinadas sustancias que se transportan, superficialmente o de forma subterránea, desde las empresas suministradoras hasta las instalaciones de clientes. Es el caso de gaseoductos, racks de tuberías, etc.
- **Vías de transporte de productos:** Los productos obtenidos deben ser transportados ya sea por ferrocarril, carretera o barco de manera segura siguiendo unos estrictos códigos de seguridad que se detallarán más adelante.

Los productos químicos forman parte de la vida cotidiana existiendo en el mundo hay de 5 a 7 millones de productos químicos distintos conocidos. Al año se producen al menos 400 millones de toneladas de productos químicos, entre ellos, productos químicos para la agricultura, aditivos de alimentos, medicinas, combustibles para la producción de energía, productos químicos de consumo, etc. Se definen una serie de conceptos previos que hay que tener en cuenta cuando se trata con productos químicos.

- **Producto químico peligroso:** aquel que puede representar un riesgo para la seguridad y salud de los trabajadores debido a sus propiedades fisicoquímicas, químicas o toxicológicas, y a la forma en que se utiliza o se halla presente en el lugar de trabajo. El control del riesgo químico en la empresa, se debe integrar dentro de la gestión general de los riesgos laborales, exige identificar todos los productos químicos que están presentes en el lugar de trabajo (materias que intervienen en el proceso productivo, así como las generadas en el mismo y los residuos), conocer su peligrosidad intrínseca y las condiciones de uso, al objeto de evaluar los riesgos para la salud y seguridad de los trabajadores originados por los agentes químicos peligrosos, obligación del empresario recogida en el Real Decreto 374/2001.
- **Productos químicos o agentes químicos:** bajo este nombre se engloban tanto las sustancias químicas como los preparados.
- **Sustancias químicas:** los elementos químicos y sus compuestos, tal y como se presentan en su estado natural o como se producen por la industria.
- **Preparados químicos:** mezclas o soluciones que están compuestas de dos o más sustancias químicas.

La clasificación de los productos químicos se efectúa en función de las siguientes propiedades:

- **Clasificación por propiedades físico-químicas:**
  - **Explosivos:** Sustancias y preparados sólidos, líquidos pastosos o gelatinosos que pueden reaccionar formando gases que en determinadas condiciones detonan, deflagran o explosionan.
  - **Comburentes:** Sustancias y preparados que, en contacto con otras sustancias, en especial inflamables, producen una reacción fuertemente exotérmica.
  - **Fácilmente inflamable:** Sustancias y preparados que pueden calentarse e inflamarse en el aire a temperatura ambiente sin aporte de energía.
  - **Inflamables:** Sustancias y preparaciones líquidas cuyo punto de inflamación se sitúe entre los 21 y 55 °C.
  - **Extremadamente inflamables:** Sustancias y preparados líquidos con punto de ignición extremadamente bajo y punto de ebullición bajo, así como las sustancias y preparados

gaseosos que a temperatura y presión normales resultan inflamables en contacto con el aire.

➤ **Clasificación según sus propiedades toxicológicas:**

La clasificación se basa tanto en los efectos agudos como a largo plazo que producen sustancias y preparados a consecuencia de una sola exposición o de exposiciones repetidas o prolongadas.

- **(Muy) tóxicos:** Sustancias y preparados que pueden provocar efectos agudos o crónicos e incluso la muerte, mediante la inhalación, ingestión o penetración cutánea de los mismos en el cuerpo humano en pequeñas cantidades.
- **Tóxicos:** Sustancias y preparados que pueden provocar efectos agudos o crónicos e incluso la muerte, mediante la inhalación, ingestión o penetración cutánea de los mismos.
- **Nocivos:** Sustancias y preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea puedan entrañar riesgos de gravedad limitada.
- **Corrosivos:** Sustancias y preparados que, en contacto con tejidos vivos, puede ejercer una acción destructiva de los mismos.
- **Irritantes:** Sustancias y preparados no corrosivos que pueden provocar una reacción inflamatoria por efecto del contacto con la piel o las mucosas.

➤ **Clasificación por sus efectos sobre la salud humana:**

- **Carcinogénicos:** Sustancias y preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea, puedan producir cáncer o aumentar su frecuencia.
- **Mutagénicos:** Sustancias y preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea, puedan producir alteraciones genéticas hereditarias o aumentar su frecuencia.
- **Tóxicos para la reproducción:** Sustancias y preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea, puedan producir efectos negativos no hereditarios en la descendencia o afectar de forma negativa a la función o la capacidad reproductora.

➤ **Clasificación según sus efectos sobre el Medio Ambiente:**

- **Peligroso para el Medio Ambiente:** Sustancias y preparados que presentan un peligro inmediato o futuro para uno o más componentes del Medio Ambiente.

- **Riesgo de incendios**

Generalmente el fuego se produce cuando una fuente de calor entra en contacto con material combustible. Si el material combustible es un sólido o un líquido, debe ser calentado para generar una cantidad suficiente de vapores que formen una mezcla inflamable en contacto con el oxígeno del aire. Si esta mezcla inflamable continúa calentándose hasta el punto de ignición, entonces se produce la reacción de combustión. Así, para que se genere el fuego deben estar presentes al mismo tiempo combustible, comburente (oxígeno) y calor:

1. **Combustible:** El combustible es el material reductor. Puede ser sólido, líquido o gas. No obstante, la mayoría de los sólidos y líquidos deben vaporizar antes de quemarse.

2. Oxígeno (comburente): El oxígeno debe estar presente en una cantidad adecuada en la atmósfera que rodea el combustible para que se genere el fuego.
3. Calor: Para que el combustible alcance su temperatura de ignición, es precisa la aplicación de una cierta cantidad de energía.

En general, en la industria química, el primer método de extinción de incendios consiste en eliminar el combustible. En caso de fugas, esto se consigue cerrando válvulas. Si esto no puede hacerse o es arriesgado debido a la magnitud de la fuga, el segundo método a adoptar es la eliminación del calor. La manera más usual es aplicando agua al fuego. La tercera manera de extinguir el incendio es eliminando el aporte de oxígeno mediante la adición de espumas o gases inertes (sofocación).

Es importante saber diferenciar entre fuego e incendio. Un incendio es “un fuego no controlado, que quema lo que no está destinado a arder”. En definitiva, la diferencia entre fuego e incendio radica únicamente en el grado de control que tenemos sobre el proceso.

Hay varios tipos de incendios:

➤ Incendio flash (“flash fire”)

Ocurre cuando se quema una nube gaseosa inflamable. La ignición comienza normalmente en los límites de la nube y se extiende hacia el punto de emisión. La duración de este tipo de incendios es normalmente breve (segundos), pero puede convertirse en un incendio de chorro si continúa la emisión de vapores. Las sobrepresiones creadas por este tipo de incendios no son generalmente importantes, y el mayor riesgo radica en la generación de llamas que pueden entrar en contacto con otras partes del proceso. Al ser incendios de poca duración, los efectos de la radiación son menos importantes que en los incendios de charco o de chorro.

➤ “BLEVEs”

En realidad es un tipo de explosión, pero por su relación con los incendios se puede incluir en la clasificación de tipos de incendios. Es el acrónimo de “Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion”: explosión en la que participa un líquido en ebullición que se incorpora rápidamente al vapor en expansión.

El término se usa en referencia a la ruptura catastrófica de un recipiente que contiene una sustancia licuada a presión. La causa más frecuente de una “BLEVE” es un incendio externo, ya que el calentamiento del recipiente debilita su estructura, a la vez que aumenta su presión interna debido a la generación de vapores. Una pequeña ruptura provoca la despresurización del recipiente y una evaporación instantánea de su contenido, lo que genera un rapidísimo aumento de presión que provoca la ruptura completa del tanque, con una fuerte onda expansiva y, si hay ignición del gas, una bola de fuego de considerable poder destructivo. Es normal que grandes porciones del recipiente salgan despedidas a muy grandes distancias (hasta 1 km.). Los efectos a considerar en una “BLEVE” son: onda de presión, formación de proyectiles y radiación térmica.

➤ Bolas de fuego (“fireballs”)

Las bolas de fuego son incendios muy intensos que se generan como consecuencia de “BLEVEs”. Son típicamente de corta duración (5-20 segundos) y los daños suelen ser especialmente importantes en las personas.

➤ Incendios en chaco o de dos dimensiones (“pool fires”)

Consisten en la combustión de vapores emitidos en la superficie de un líquido. Normalmente se originan por la emisión accidental de líquidos inflamables procedentes de equipos o depósitos de almacenamiento. Si es un líquido por debajo de su punto de ebullición, se formará un charco en el lugar de la fuga. La geometría del charco vendrá determinada por el entorno. Así, el charco tendrá dimensiones fijas si se encuentra en un cubeto o podrá crecer por falta de diques que lo contengan. La radiación emitida por un charco incendiado es de vital importancia a la hora de determinar distancias de seguridad entre depósitos. Un parámetro fundamental para el cálculo de los efectos de un incendio de charco es la velocidad de combustión del charco, la cual depende a su vez de la velocidad de evaporación del combustible, puesto que lo que arden son los vapores de combustible y no la fracción líquida.

➤ Incendios en chorro o gaseosos (“jet fires”)

Este tipo de incendios ocurren como consecuencia de la emisión accidental de gases de proceso. Se caracterizan por altas presiones de liberación de gas en aperturas pequeñas (fugas en líneas, válvula de drenaje rota o fisuras en depósitos). Las consecuencias dependerán del tamaño de llama y del caudal de liberación del gas.

El riesgo de inflamabilidad de una sustancia se agrava también con las siguientes circunstancias:

- Amplios límites de inflamabilidad
- Baja temperatura de autoignición
- Baja energía de inflamabilidad
- Alta velocidad de combustión
- Aumento de la temperatura del combustible
- Atmósfera rica en oxígeno

Los límites de inflamabilidad definen las relaciones de mezcla combustible-comburente que reúnen condiciones estequiométricas para reaccionar. Así, los vapores inflamables sólo se queman en un determinado rango de concentración de aire/combustible. El rango de inflamabilidad se define mediante dos parámetros: límite de inflamabilidad inferior (LII) y límite de inflamabilidad superior (LIS).

- El límite de inflamabilidad inferior es la concentración mínima en % en volumen de combustible en mezcla con el aire, por debajo de la cual la mezcla es demasiado pobre para que arda o explote.
- El límite de inflamabilidad superior es la concentración máxima de combustible, por encima de la cual la mezcla es demasiado rica para que arda.

También hay que definir otra propiedad importante, el punto de inflamación o destello (flash point), siendo este la temperatura mínima a la cual un líquido desprende la suficiente cantidad de vapores para que, en mezcla con el aire, se produzca la ignición, mediante el aporte de una energía de activación. Para un líquido, a medida que su temperatura aumenta, la presión parcial (y, por tanto, la composición) del vapor que se encuentra por encima de la superficie se incrementa. El flash point se produce cuando la presión de vapor corresponde con una concentración de vapor superior al límite inferior de inflamabilidad. En general, se considera que un líquido es inflamable cuando su “flash point” es inferior a 38°C.

Por último, también hacer mención a la temperatura de autoignición. La temperatura de autoignición de una sustancia sólida, líquida o gaseosa es la mínima temperatura a la cual se genera de manera espontánea una combustión autónoma sin necesidad de una fuente externa de ignición. En otras palabras, es la temperatura mínima a la cual la sustancia en aire debe ser calentada para iniciar o causar su propia combustión en ausencia de chispa o llama. La ignición se inicia debido al propio nivel térmico de la mezcla (autoignición).

#### - Agentes de extinción

Los agentes de extinción más comúnmente empleados son: agua, espuma, dióxido de carbono, polvo químico seco y derivados halogenados. Se muestra a continuación una tabla donde se exponen las principales ventajas y limitaciones de los distintos agentes de extinción.

**Tabla 5.1.**  
Ventajas y limitaciones de los distintos agentes de extinción

Agente	Acción empleada	Ventajas	Limitaciones
Agua	Enfriamiento Dilución Sofocación	Gran disponibilidad Bajo coste	Sólo adecuada para tipos A y B. No puede emplearse para fuegos eléctricos
Espuma	Sofocación Refrigeración	Ideal en el caso de incendios de charco	Sólo adecuada para tipos A y B. No puede emplearse para fuegos eléctricos
CO <sub>2</sub>	Sofocación Enfriamiento	No reactivo No deja residuo Adecuado para clase fuegos eléctricos	Tóxico para las personas Poco enfriamiento
Polvo químico seco	Ruptura de reacción en cadena	Apto para fuegos C y eléctricos	El fuego puede avivarse en caso de presencia de fuentes de alta temperatura

Fuego tipo A: combustibles sólidos

Fuego tipo B: combustibles líquidos

Fuego tipo C: gases inflamables

Fuego tipo D: metales combustibles y compuestos radiactivos

- **Elementos activos de protección contra incendios**

➤ **Sistemas de detección y alarma:**

Se entiende por detección el descubrimiento de la existencia de un incendio, inmediatamente después de que se haya iniciado. La característica fundamental de la detección, para que pueda ser considerada eficaz, es la rapidez de respuesta. Una detección rápida permitirá la extinción del incendio en sus inicios y evitará su propagación. Se debe procurar detectar el incendio en sus primeras etapas (humos invisibles y humos visibles), antes de la aparición de las llamas. Una detección rápida de un incendio sería ineficaz si no viniese acompañada de una localización correcta del mismo, que facilite la actuación del equipo de extinción.

➤ **Extintores portátiles:**

Son aparatos autónomos que contienen un agente de extinción, que puede ser proyectado y dirigido sobre un fuego por la acción de una presión interior. Son de eficacia limitada, por lo que se deben utilizar sólo en los primeros momentos del fuego, ya que tienen un alcance limitado (unos 6 metros) y escasa duración (menos de 1 minuto).

➤ **Bocas de incendio equipadas (BIE) y mangueras:**

Se diferencian de los extintores en que no son autónomos, sino que dependen de una fuente externa de suministro del agente de extinción (agua). Pero tienen la particularidad, con respecto a las instalaciones fijas, de que puede dirigirse manualmente su punto de aplicación.

➤ **Sistemas fijos de extinción:**

Las instalaciones fijas están dispuestas de manera que en general entran en funcionamiento automáticamente en cuanto se produce el incendio. Sin embargo, también se instalan dispositivos de esta clase con accionamiento manual. El agente de extinción se dirige siempre sobre un punto fijo de la instalación. El esquema general de un sistema fijo de extinción se compone de:

- Equipo de control y alarma.
- Dispositivo de disparo (manual o automático).
- Depósito de agente extintor.
- Líneas de distribución.
- Boquillas de descarga.

Se suelen emplear sistemas fijos de extinción en instalaciones de gran valor, cuando no se pueden admitir retrasos, o cuando hay que cubrir una gran superficie para la que no hay suficiente personal.

➤ Instalaciones complementarias:

Son elementos auxiliares, empleados exclusivamente por los Servicios de Extinción de Incendios (bomberos) que ayudan a combatir los incendios. Sus conexiones están normalizadas (racor Barcelona).

• **Riesgo de explosión**

Una *explosión* es un "fenómeno originado por un súbito cambio físico o químico en el estado de una masa que produce una gran liberación de energía y un aumento de volumen de un gas o vapor (aire, vapor de agua, gases de combustión, etc.) en un medio, recipiente, atmósfera, local, etc. que opone resistencia a dicho aumento". (Seguridad en el Trabajo, *INSHT, 4ª edición, 2003*).

Las explosiones se pueden clasificar atendiendo a la forma de desarrollarse o a su origen. Según la forma de desarrollarse pueden ser:

- Confinadas: Cuando suceden dentro de un recipiente o recinto determinado. Ejemplo: la explosión de un reactor químico;
- No confinadas: Cuando suceden al aire libre y generalmente requieren una gran cantidad de masa combustible para que sea significativo el aumento de presión. Ejemplo: deflagración de una nube de vapor inflamable.

Atendiendo a su origen, las explosiones se pueden clasificar en explosiones químicas y explosiones físicas, según se deban a reacciones químicas o a cambios en las condiciones de presión y temperatura.

- Explosiones químicas: debidas a reacciones químicas violentas, tales como la combustión de una mezcla de aire y gas o polvo, la descomposición de una sustancia explosiva u otras formas de reacción de los compuestos consigo mismos (polimerización, descomposición). Las explosiones químicas se clasifican en estos tres grandes grupos:
  - a) Explosiones por deflagración o detonación de gases o vapores.
  - b) Explosiones por deflagración de polvos
  - c) Explosiones de descomposición. Sustancias explosivas.
- Explosiones físicas consisten en un fenómeno de expansión de un fluido contenido en un recipiente, que genera una presión sobre sus paredes suficiente para provocar su rotura.

Son consecuencia de cambios rápidos en las condiciones de presión y/o temperatura, que llevan a una sobrepresión capaz de romper las paredes del recipiente en que se contiene el sistema. Éste es el caso de la explosión en calderas, cilindros de gas u otros recipientes a presión.



La causa de la expansión, más o menos rápida, del fluido es, generalmente, una vaporización masiva, bien por sobrecalentamiento o por despresurización. En otros casos, puede ser una expansión térmica de un gas o un líquido contenido en un recipiente.

El efecto es siempre una rotura violenta del recipiente y, como resultado de ésta:

- Proyección al exterior de los trozos de material del recipiente destruido, con el consiguiente riesgo directo para las personas, e indirectamente por impacto en otros equipos (incendio, explosión o destrucción).
- Salida al exterior de la sustancia contenida, lo que a su vez implica diversos riesgos asociados a su naturaleza o a su estado físico (quemaduras en personas y fuente de calor para combustibles cercanos, explosión química, corrosión, toxicidad, radiactividad).

- **Riesgo eléctrico**

El riesgo eléctrico puede definirse como "la posibilidad de circulación de una corriente eléctrica a través del cuerpo humano". En general, para que exista la posibilidad de circulación de corriente eléctrica, es necesario que se cumplan a la vez las siguientes condiciones:

- Que exista un circuito eléctrico formado por elementos conductores.
- Que el circuito esté cerrado o pueda cerrarse.
- Que en el circuito exista una diferencia de potencial.

Así, existirá la posibilidad de circulación de corriente eléctrica por el cuerpo humano cuando:

- Éste sea conductor.
- Forme parte de un circuito eléctrico.
- Exista una diferencia de potencial entre los puntos de "entrada" y "salida" de la corriente eléctrica en el cuerpo.

Para combatir el riesgo eléctrico es muy importante tener en cuenta lo conocido como valores límites. Los valores límites umbral tienen por misión definir los niveles óptimos de seguridad, limitando de forma razonable los riesgos que puede presentar una instalación eléctrica (sólo podríamos eliminar el riesgo eléctrico si suprimimos todo uso de electricidad).

De acuerdo con las consideraciones y con las zonas tiempo-intensidad de la gráfica1, las condiciones de protección deben situarse normalmente en la zona II. La curva b, que limita superiormente dicha zona, se denomina "curva de seguridad" y establece los tiempos máximos de actuación de los dispositivos de corte automático, en función de la intensidad de contacto. Responde a la ecuación:

$$I = I_{\text{límite}} + 10/t$$

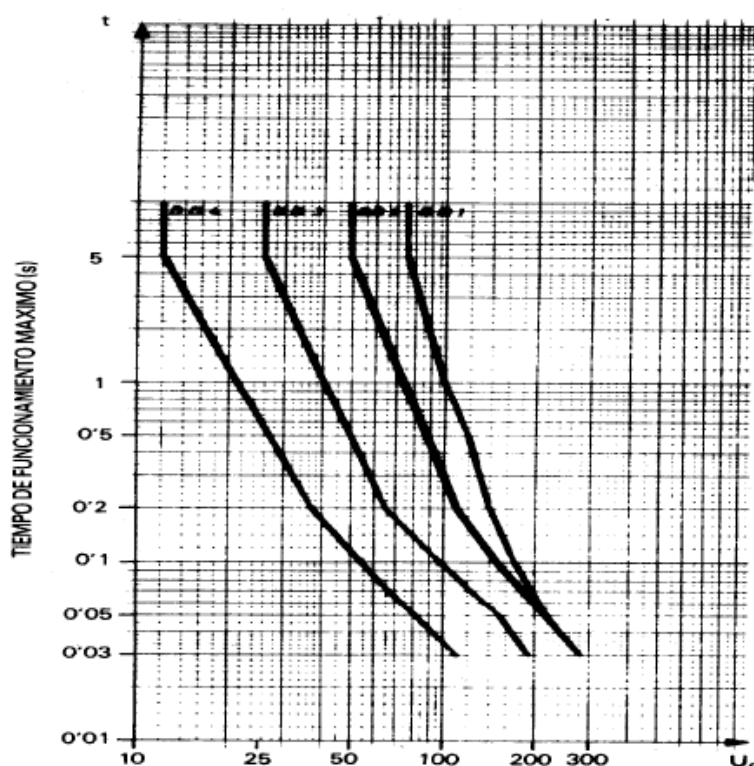
Siendo  $I_{\text{límite}}$  igual a 10 mA y t es el tiempo de exposición medido en segundos.

Sin embargo, las zonas tiempo-intensidad son inadecuadas para aplicarlas al diseño de las instalaciones, ya que el valor de la intensidad de corriente que puede atravesar el organismo

en el caso de un contacto eléctrico, no es directamente medible (depende de las resistencias de contacto, de la trayectoria de corriente...). Por ello, las medidas de protección están basadas en establecer valores límites basados en diferencias de potencial, que sí son directamente medibles:

La "tensión límite convencional" es el valor máximo de la tensión que puede mantenerse, sin peligro para las personas, entre dos elementos simultáneamente accesibles. Se denomina también "tensión de seguridad".

La "curva de seguridad" es la que fija el tiempo máximo de funcionamiento de los dispositivos de corte automático, en función de la tensión de contacto esperada. El valor de la tensión límite convencional es el valor asintótico de la curva de seguridad para un tiempo infinito. Valorando las probabilidades de contacto, en la práctica se adoptan como curvas de seguridad, de acuerdo con los diferentes grados de humedad de la piel, las representadas en la figura 1.



**Figura 20.1.** Curvas de seguridad t-tensión de contacto, en función de las condiciones de humedad de la piel, valorando las probabilidades de contacto (corriente alterna)

Una tensión de contacto igual como máximo a la tensión límite convencional, puede mantenerse indefinidamente y, cualquier tensión de contacto superior a ella debe ser cortada en un tiempo que no exceda del definido en la gráfica. Las tensiones de seguridad prescritas por el Reglamento Electrotécnico de Baja tensión son:

- 12 voltios, para condiciones de inmersión.
- 24 voltios, para locales o emplazamientos mojados.
- 50 voltios, para locales o emplazamientos húmedos.
- 75 voltios para locales o emplazamientos secos.

- **Riesgos en la manipulación de maquinaria y herramientas**

La máquina es uno de los elementos de mayor entidad que interviene en los procesos productivos de las empresas; la importancia que tiene el tratamiento de los riesgos de seguridad y de salud es evidente tanto en el proceso de su fabricación como de su utilización.

La reglamentación española, en lo referente a los requisitos esenciales de seguridad y salud en las Máquinas, está desarrollada a través de los Reales Decretos:

- 1435/1992, de 27 de noviembre por el que se dictan las disposiciones de aplicación de la Directiva del Consejo 89/392/CEE, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre Máquinas, y
- 56/1995, de 20 de enero, por el que se modifica el anterior.
- Será también de aplicación el RD 1495/1986, de 26 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad en las Máquinas, donde se tuvieron en cuenta los Convenios de la O.I.T., concretamente el Convenio 119, relativo a la protección de la maquinaria y el Convenio 155, sobre Seguridad y Salud de los Trabajadores y Medio Ambiente en el Trabajo.

Evidentemente, el hecho de que una máquina reúna todas las medidas de seguridad jamás va a garantizar que en esa máquina no puedan producirse accidentes.

Las medidas preventivas de Seguridad en Máquinas han de estar, siempre que sea posible, integradas en la propia estructura de la máquina. El orden en el que se adoptarán estas medidas será el siguiente.

1. Evitar el peligro o reducir el riesgo (Medidas de Prevención Intrínsecas).
2. Protección contra Riesgos Inevitables (Medidas de Protección No intrínsecas).
3. Informar y advertir a los usuarios (Formación y Advertencias), cuando la protección no es posible.
4. Disposición Suplementaria.

### **20.1.3. Protección personal**

El deber general de protección de los trabajadores aparece regulado en nuestro ordenamiento jurídico laboral como uno de los aspectos más importantes dentro del campo de la seguridad y salud laboral. Se trata de una obligación de carácter recíproco entre empresarios y trabajadores puesto que se establecen derechos y deberes para ambas partes. Se debe anteponer la protección colectiva a la individual. Cuando hablamos de protección colectiva e individual nos referimos a técnicas de protección que tiene como evitar o disminuir la consecuencia del accidente (daño), bien a un colectivo de trabajadores, bien a un solo trabajador.

- **Equipos de protección individual**

Se entiende por protección individual o personal la técnica que tiene como objetivo el proteger al trabajador frente a agresiones externas, ya sean de tipo físico, químico o biológico, que se puedan presentar en el desempeño de la actividad laboral.

Esta técnica constituye el último eslabón en la cadena preventiva entre el hombre y el riesgo, resultando de aplicación como técnica de seguridad complementaria de la colectiva, nunca como técnica sustitutiva de la misma.

La misión de la protección individual no es la de eliminar el riesgo de accidente, sino reducir o minimizar las consecuencias personales o lesiones que este pueda producir en el trabajador. Dentro de sus labores rutinarias, el trabajador de campo siempre debe disponer de la indumentaria compuesta por: mono de trabajo, gafas, guantes protectores, botas y casco.

En el caso de que sea necesario llevar a cabo tareas de mayor envergadura o que supongan un contacto más directo con los puntos de peligro, deberán estar provisto de pantalla facial de protección, delantal e, incluso equipos autónomos de respiración, en especial durante la manipulación de las unidades que contengan los agentes químicos descritos y, especialmente, en las fugas de producto.

Características generales de los EPIs:

- Respecto a los materiales empleados:
  - Propiedades físico-químicas adecuadas al riesgo a proteger
  - No produzcan efectos nocivos
- Respecto a su diseño:
  - Adaptación al usuario
  - Forma adecuada para el mayor número de personas
  - Reducir al mínimo su incomodidad.
  - Cuidar su estética.
  - Fácil manejo
  - Fácil mantenimiento y conservación
  - No produzca pérdidas de rendimiento.

Clasificación de los EPIs:

- a) Según el grado de protección:
  - Protección parcial: zonas determinadas del cuerpo. Cascos, guantes..
  - Protección integral: no especifica partes. Trajes térmicos, cinturón anticaídas, etc.
- b) Según el tipo de riesgo a proteger:
  - Protección frente a agentes físicos: mecánicos o no mecánicos. P.ej. tapones
  - Protección frente a agentes químicos. P.ej. mascarilla
  - Protección frente a riesgos biológicos. P.ej. trajes especiales.
- c) Atendiendo a la zona a proteger:

- Cabeza
- Oído
- Ojos y cara
- Vías respiratorias
- Manos y brazos
- Piernas y pies
- Piel
- Tronco y abdomen
- Todo el cuerpo

- **Equipos de protección colectiva**

La Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales especifica: “adoptar medidas colectivas que antepongan la protección colectiva frente a la individual”.

Se entiende por protección colectiva aquella técnica de seguridad cuyo objetivo es la protección simultánea de varios trabajadores expuestos a un determinado riesgo.

Dentro de este grupo, se dispondrá de:

- Vallas de limitación y protección.
- Andamios y cables para sujeción del cinturón de seguridad.
- Pasarelas.
- Señales de seguridad.
- Casetas de protección contra intemperie.
- Protecciones de máquinas cortadoras.
- Interruptores diferenciales.
- Toma de tierra.
- Protecciones magnetotérmica.
- Protecciones diferenciales.
- Conexión a la red de tierra.

#### **20.1.4. Alumbrado**

La iluminación en un local y en sus distintos puestos de trabajo implica un análisis previo, no sólo de las necesidades de alumbrado de acuerdo con las tareas que se realizan en el lugar, sino también de aspectos económicos, tales como: el consumo energético, los costes y disponibilidades de luminaria y lámparas, posibilidades de aprovechamiento de la luz natural.

Para diseñar un sistema de alumbrado en un local deben considerarse, al menos, los siguientes aspectos: nivel de iluminación que requiere la actividad, tipo de luminaria, distribución, distancia al plano de trabajo, tipo de iluminación, tipo de lámparas utilizadas, potencia, alumbrado suplementario y grado de mantenimiento, ventanas, otras entradas de luz, etc.

También hay otros factores, como la edad del trabajador, las fatigas física y mental, los defectos visuales, etc., que no se pueden obviar en el análisis.

- **Alumbrado interior:**

La iluminación de cada zona o parte de un lugar de trabajo deberá adaptarse a las características de la actividad que se efectúe en ella, teniendo en cuenta los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores dependientes de las condiciones de visibilidad y las exigencias visuales de las tareas desarrolladas.

La iluminación de los lugares de trabajo deberá cumplir, además, en cuanto a su distribución y otras características, las siguientes condiciones:

- La distribución de los niveles de iluminación será lo más uniforme posible.
- Se procurará mantener unos niveles y contrastes de luminancia adecuados a las exigencias visuales de la tarea, evitando variaciones bruscas de luminancia dentro de la zona de operación y entre ésta y sus alrededores.
- Se evitarán los deslumbramientos directos producidos por la luz solar o por fuentes de luz artificial de alta luminancia. En ningún caso éstas se colocarán sin protección en el campo visual del trabajador.
- Se evitarán, asimismo, los deslumbramientos indirectos producidos por superficies reflectantes situadas en la zona de operación o sus proximidades.
- No se utilizarán sistemas o fuentes de luz que perjudiquen la percepción de los contrastes, de la profundidad o de la distancia entre objetos en la zona de trabajo, que produzcan una impresión visual de intermitencia.

Siempre que sea posible, los lugares de trabajo tendrán una iluminación natural, que deberá complementarse con una iluminación artificial cuando la primera, por si sola, no garantice las condiciones de visibilidad adecuadas.

- **Alumbrado de emergencia:**

Cumplirá las siguientes condiciones:

- Será fija, estará provista de fuente propia de energía y entrará automáticamente en funcionamiento al producirse un fallo del 70 por ciento de su tensión nominal de servicio.
- Mantendrá las condiciones de servicio durante una hora, como mínimo, desde el momento en que se produzca el fallo.
- Proporcionará una iluminancia de un lux, como mínimo, en el nivel del suelo en los recorridos de evacuación y de 5 lux al lado de los sistemas de protección contra incendios.

Se coloca una luz de emergencia al lado de cada extintor, así como en todas las salidas. Además estará provista de carteles con indicación de salida.

### 20.1.5. Gestión de la Seguridad

Una buena gestión de la prevención y seguridad pasa por establecer y desarrollar un Sistema de Gestión de la Prevención, que establezca los objetivos y especificaciones necesarios para desarrollar la acción preventiva.

Esta acción preventiva incluye la política de prevención, la estructura organizativa, las responsabilidades, los documentos, los procedimientos, los procesos y los recursos para llevar a cabo dicha política.

La gestión de la seguridad comprende el conjunto de medidas desarrolladas para organizar la coordinación y el funcionamiento en materia de seguridad. Este campo comprende los siguientes aspectos:

- **Coordinación de seguridad**

La propiedad designará una persona que actuará como Coordinador de seguridad de los trabajos de organización, montaje y operación en la línea de proceso.

Cuando se detecte una interferencia para la seguridad entre trabajadores de distintos subcontratistas se coordinarán dichas actividades entre los responsables de seguridad o de obra de los contratistas afectados, los responsables directos de los trabajos por parte de la Dirección de Obras y el Coordinador de Seguridad.

- **Registro de información de seguridad**

Todo el personal involucrado en la construcción, montaje y manipulación de unidades es un “responsable de seguridad”, por lo tanto, además de la necesidad de que toda la información relacionada con la seguridad llegue al conocimiento del Coordinador de Seguridad, debe ser también accesible en todo momento a cualquiera que deba tomar una decisión de seguridad. El registro de la información se centralizará en el Coordinador de Seguridad, existiendo las siguientes fuentes de información:

- Relación de permisos de trabajo: se registrarán todos los permisos de trabajo autorizados para la operación dentro de la zona de proceso. Es obligación del solicitante de cada permiso reflejar en dicha lista las fechas de autorización del permiso y de la finalización del trabajo, según los Procedimientos correspondientes.
- Fichas de incidencia de seguridad: se encontraran en poder del Coordinador de Seguridad para el registro de las incidencias de seguridad. Estas fichas serán normalmente cumplimentadas por el Coordinador de Seguridad.
- Informes de accidentes e incidentes: que se realizarán según el procedimiento establecido.
- Plan de Seguridad de los trabajos: en la oficina del Coordinador de seguridad se mantendrá permanentemente una copia actualizada del Plan para la ejecución de los trabajos.

- **Formación**

Todo el personal recibirá cursos de formación acerca de la operación en equipos, materias primas, productos, información sobre los riesgos que estas actividades pueden entrañar así como las normas de comportamiento que deben cumplir durante la jornada de trabajo. Se impartirán cursillos de socorrismo y primeros auxilios a las personas más cualificadas, de manera que en todo momento haya algún socorrista.

Antes del comienzo de nuevos trabajos específicos se instruirá a las personas que en ellos intervengan sobre los riesgos que van a encontrarse y el modo de evitarlos.

#### **20.1.6. Higiene industrial**

La higiene industrial es una técnica no médica de prevención de enfermedades profesionales. Para la A.I.H.A. (American Industrial Hygienst Association) se trata de la “ciencia y arte dedicados al reconocimiento, evaluación y control de aquellos factores ambientales o tensiones emanadas o provocadas por el lugar de trabajo que puede ocasionar enfermedades, destruir la salud y el bienestar, o crear algún malestar significativo entre los trabajadores o los ciudadanos de una comunidad”.

El objeto de esta técnica será obtener una opinión acerca del grado de peligro para la salud, proveniente de un agresivo industrial que se produce durante las operaciones industriales. Por lo tanto se siguen los siguientes pasos:

- Identificar el puesto de trabajo.
- Los peligros procedentes del medio ambiente laboral existentes en el mismo.
- Evaluar el riesgo, en función de los diferentes criterios y procedimientos.
- Por último y si fuera necesario, controlar el riesgo evaluado.

Se da lugar a una evaluación ambiental, siendo eta un diagnóstico sobre una situación producida por uno o varios factores ambientales, e incluso, la acción combinada de ellos, basada en los datos obtenidos en unas mediciones o estimadores de la exposición, y todo ello en relación a unos criterios higiénicos de valoración o estándares de exposición. Se trata, en resumen, de comparar unos niveles de exposición con unos criterios admisibles.

#### **20.1.7. Planes de emergencia y evacuación**

El manual de autoprotección tiene por objeto principal la redacción e implantación de un plan de emergencia que optimice la organización y utilización de los medios humanos y materiales disponibles en la prevención y lucha contra los diversos riesgos existentes. Con la implantación del manual se pretende la prevención del riesgo y, en caso de accidente, la intervención inmediata y la evacuación en caso de ser necesaria.



La terminología y los distintos equipos analizados se adaptan a lo indicado en el “Manual de autoprotección” aprobado por la orden de 29 de noviembre de 1984 del Ministerio del Interior.

Los objetivos que persiguen con la redacción del manual son:

- a) Conocer los edificios y sus instalaciones (continente y contenido), la peligrosidad de los distintos sectores y los medios de protección disponibles, las carencias existentes según la legislación vigente y las necesidades que deban ser atendidas prioritariamente.
- b) Garantizar la fiabilidad de todos los medios de protección y de las instalaciones generales.
- c) Evitar las causas de las emergencias.
- d) Disponer de personas organizadas, formadas y adiestradas que garanticen rapidez y eficacia en las acciones que hay que emprender para el control de las emergencias.
- e) Tener informados a todos los ocupantes de los edificios de cómo deben prevenir y actuar ante una emergencia de incendio.

Para cumplir los objetivos enunciados se preparará un plan de autoprotección que comprenderá cuatro documentos:

- Evaluación del riesgo: enunciará y valorará las condiciones de riesgo de los edificios en relación con las actividades desarrolladas y los medios de protección disponibles.
- Medios de protección: determinará los medios materiales y humanos disponibles y precisos. Se definirán los equipos y sus funciones y otros datos de interés para garantizar la prevención de riesgos y el control inicial de las emergencias que ocurran.
- Plan de emergencia: contemplará las diferentes hipótesis de emergencias y los planes de actuación para cada una de ellas y las condiciones de uso y mantenimiento de las instalaciones.
- Implantación: consiste en la divulgación general del plan, la formación específica del personal incorporado al mismo, la realización de simulacros, así como su revisión para su actualización cuando proceda.

El manual de autoprotección se redacta para conocimiento por parte de responsables de la seguridad del establecimiento y con el fin de ofrecer una información exhaustiva a los servicios públicos de extinción de incendios y a los servicios de protección civil. Estas dos entidades deberán tener copia del manual.

## **20.2. Seguridad en el proceso**

En el presente apartado, basándose en la legislación en materia de seguridad explicadas anteriormente y las características de las sustancias y los equipos, se aplicará la primera fase en el planteamiento de la seguridad: fase de localización de riesgos. Así, se expondrán los diferentes riesgos a los que se encuentra sometido a la planta.

Se ha encontrado que en la planta en estudio existen los siguientes riesgos:

- Riesgo químico.
- Riesgo físico.
- Riesgo de incendio y explosión.
- Riesgo eléctrico.
- Riesgo en la manipulación de máquinas y herramientas de trabajo.
- Riesgo en la línea de proceso.
- Riesgo en el almacenamiento de productos químicos.

A continuación se exponen cada uno de ellos.

### 20.2.1. Riesgo químico

El riesgo químico es el riesgo que existe al ponerse en contacto con sustancias peligrosas. El Real Decreto 374/2001 de 6 de abril sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo define los agentes químicos como cualquier elemento o compuesto químico (por sí solo o mezclado, utilizado o vertido, incluido el vertido como residuo, en una actividad laboral, se haya elaborado o no de modo intencional y se haya comercializado o no) y a la exposición a un agente en el lugar de trabajo que implica el contacto de éste con el trabajador, normalmente por inhalación o vía dérmica.

Los contaminantes químicos pueden encontrarse en forma multitud de formas: partículas, líquidos, gases, vapores, humos, nieblas y aerosoles. Las principales vías de entrada de estos compuestos al organismo son la vía dérmica, respiratoria, digestiva y parenteral.

Los agentes químicos que se usan en la planta en estudio son:

- **Hidrógeno:** el hidrógeno se encuentra en estado gas durante todo el proceso en la planta debido a las condiciones de operación. Es un gas, más ligero que el aire, extremadamente inflamable.

En la planta el hidrógeno es una impureza del metanol que proviene del PFC “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural**”, por lo que no se almacena en ningún punto de la planta y no se operará con gran cantidad de éste.

El efecto principal que provoca a la salud de las personas es, si la exposición es de corta duración, que puede causar mareos, voz estridulosa y asfixia.

A nivel colectivo, al ser muy inflamable, forma fácilmente mezclas explosivas, lo que conlleva peligro de incendio y explosión. Además, existen también peligro de incendio u explosión, al reaccionar violentamente con cloro, aire, oxígeno, flúor y oxidantes fuertes.

Para más información véase su ficha de seguridad en el **Anexo 15**.

Las medidas preventivas que se ha decidido adoptar en el proceso con respecto al hidrógeno son:

- ✓ Intentar evitar, en todo lo que sea posible, cualquier escape o fuga que pueda originarse en las líneas de proceso (las cuales pueden provocar daños a la salud y peligro de incendiarse en contacto con una fuente de ignición).
- ✓ Cuando se estén realizando operaciones de mantenimiento en el proceso, se dispondrá de un equipo autónomo de respiración así como las protecciones individuales pertinentes.
- ✓ No fumar ni emplear equipos electrónicos en las inmediaciones del recinto de proceso (al ser fuentes de ignición).

Las medidas pertinentes ante posibles riesgos y explosiones se recogen en el apartado destinado a ello.

- **Metanol:** el metanol con el que se opera en la planta se encuentra tanto en estado líquido como gas. Es incoloro tanto en estado gas como líquido, es bastante volátil, altamente inflamable, tóxico, y posee un olor característico.

En la planta se opera con gran cantidad de este compuesto desde el depósito de metanol hasta el reactor R-01. A la salida de éste el metanol es una pequeña proporción de la salida, siendo casi despreciable la cantidad que se encuentra en las corrientes, por lo que las medidas de prevención-protección con respecto al metanol estarán destinadas sobre todo a los equipos que trabajen con gran cantidad de metanol.

Los efectos que puede producir en las personas a nivel individual son muchos, entre los que se pueden citar los siguientes:

- Si se inhala produce tos, vértigo, dolor de cabeza y náuseas.
- Se absorbe por vía dérmica provocando enrojecimiento de la piel.
- En contacto con los ojos produce enrojecimiento y dolor.
- Si se ingiere produce dolor abdominal, jadeo, pérdida de conocimiento y vómitos. En altas concentraciones produce ceguera irreversible.

A nivel colectivo tiene los siguientes efectos:

- Forma fácilmente mezclas explosivas con el aire.
- Peligro de incendio u explosión, al reaccionar violentamente con aire, oxígeno y oxidantes fuertes.

Para más información véase su ficha de seguridad en el **Anexo 15**.

Las medidas preventivas que se adoptarán serán:

- ✓ Evitar en todo lo posible cualquier escape o fuga que pueda originarse en las líneas de proceso (debido a la posibilidad de ignición como para evitar el contacto con el personal de la planta). En caso de fugas (tiene un olor bastante característico) se avisará inmediatamente al responsable de la sección y al departamento de seguridad.
- ✓ Cuando se realicen operaciones de mantenimiento, se dispondrá de un equipo autónomo de respiración así como las protecciones individuales pertinentes.
- ✓ No fumar ni emplear equipos electrónicos en las inmediaciones del recinto de proceso (al ser fuentes de ignición).
- ✓ Se crearán y emplearán los procedimientos de trabajo, controles técnicos, equipos y materiales que puedan permitir el asilamiento de éste agente en la medida de lo posible.
- ✓ Ventilación y otras medidas de prevención colectivas aplicadas, sobre todo, en aquellos equipos por los que circule o almacenen grandes cantidades de metanol. Por ello, todos los tanques irán provistos de respiraderos.
- ✓ Uso de medidas de protección individual complementarias a las anteriores como uso de guantes de seguridad impermeables, casco, gafas, indumentaria adecuada de trabajo y pantalla facial.
- ✓ Manipulación del mismo por medio de personal cualificado e informar convenientemente del peligro que supone el trabajo con dicha sustancia así como las medidas de actuación a desarrollar en caso de contacto con la misma.
- ✓ Disposición de señales que indiquen el peligro que supone dicha sustancia tanto en tanques, como en conducciones y equipos.

Las medidas pertinentes ante posibles riesgos y explosiones se recogen en el apartado destinado a ello.

- **Formaldehído:** el formaldehído es un gas en las condiciones a la que se opera en la planta, pero después de pasar por la columna de absorción A-01, el formaldehído se encuentra disuelto en agua. Aunque disuelto es menos peligroso que en estado gas (por ejemplo, la explosividad disminuye), deben extremarse todas las precauciones. Es un gas de olor muy característico y fuerte, extremadamente inflamable, muy tóxico, y disuelto es bastante volátil.

En la planta no se opera con formaldehído hasta la salida del reactor R-01, encontrándose desde ese punto hasta el absorbedor en estado gas. Es en esta etapa donde se deben extremar todas las medidas de seguridad y prevención. Después del absorbedor se encuentra disuelto, que es menos peligroso que en estado gas, pero sigue siendo un compuesto peligroso. Desde el reactor al absorbedor la proporción de formaldehído es bastante pequeña, pero a partir del absorbedor la proporción aumenta (aunque aquí esté disuelto). Las medidas de prevención-protección serán ligeramente diferentes si está en estado gas o disuelto, pero ambas serán de vital importancia.

Es el compuesto más peligroso para las personas que existe en la planta, siendo sus efectos que puede producir en las personas a nivel individual son:

- Si se inhala produce sensación de quemazón, tos, dolor de cabeza, náuseas y jadeo. En altas concentraciones puede producir edema pulmonar y la muerte.
- En contacto con la piel produce enrojecimiento de la piel y quemaduras (si está poco diluido).
- En contacto con los ojos produce enrojecimiento, dolor y visión borrosa. En altas concentraciones puede producir lesiones irreversibles en los ojos.
- Si se ingiere produce dolor abdominal, vómitos, dolor de cabeza y diarrea. En concentraciones altas produce pérdida de conciencia, pulso irregular y la muerte.
- Puede provocar cáncer con una exposición prolongada (todavía en estudio).

A nivel colectivo:

- Forma fácilmente mezclas explosivas con el aire.
- Peligro de incendio u explosión, al reaccionar violentamente con aire, oxígeno y oxidantes fuertes.

Para más información véase su ficha de seguridad en el **Anexo 15**.

Las medidas preventivas que se adoptarán serán:

- ✓ Evitar en todo lo posible cualquier escape o fuga que pueda originarse en las líneas de proceso. En caso de fugas (tiene un olor muy característico y fuerte) se avisará inmediatamente al responsable de la sección y al departamento de seguridad, evacuándose la zona lo más rápidamente posible y parando la producción si es posible.
- ✓ Cuando se realicen operaciones de mantenimiento, se dispondrá de un equipo autónomo de respiración así como las protecciones individuales pertinentes.
- ✓ No fumar ni emplear equipos electrónicos en las inmediaciones del recinto de proceso (por ser fuentes de ignición).
- ✓ Se crearán y emplearán procedimientos de trabajo, controles técnicos, equipos y materiales que permitan aislar éste agente en la medida de lo posible.
- ✓ Ventilación y otras medidas de prevención colectivas aplicadas principalmente en aquellos equipos por los que circulen o almacenen grandes cantidades de formaldehído. Por ello, todos los tanques irán provistos de respiraderos.
- ✓ Uso de medidas de protección individual complementarias a las anteriores como uso de guantes de seguridad impermeables, casco, gafas, indumentaria adecuada de trabajo, respiración autónoma y pantalla facial.
- ✓ Manipulación del mismo por medio de personal cualificado e informar convenientemente del peligro que supone el trabajo con dicha sustancia así como las medidas de actuación a desarrollar en caso de contacto con la misma.
- ✓ Disposición de señales que indiquen el peligro que supone dicha sustancia tanto en tanques, como en conducciones y equipos.

- ✓ Se realizarán controles médicos periódicos a todo el personal.
- **Catalizador:** el catalizador, que es molibdato de hierro (III), se encuentra en forma de partículas y se usa en el reactor R-01. Es un sólido verde claro inodoro. Sólo posee efectos a nivel individual, que son:
  - Si se inhala produce irritación.
  - En contacto con los ojos produce enrojecimiento e irritación.
  - Puede provocar daños serios en la salud con una exposición prolongada.

Las medidas preventivas que se adoptarán serán:

- ✓ Ventilación y otras medidas de prevención colectivas aplicadas principalmente en aquellos equipos con grandes cantidades de catalizador. Por ello, las instalaciones donde se almacene el catalizador dispondrán de respiraderos.
- ✓ Uso de medidas de protección individual como uso de gafas y respiración autónoma.
- ✓ Disposición de señales que indiquen el peligro que supone dicha sustancia tanto en tanques, como en el reactor R-01.

### 20.2.2. Riesgo físico

Los riesgos físicos más comunes que se pueden encontrar en una planta química pueden ser:

- Ruido.
- Radiaciones ionizantes.
- Ambiente térmico.

En la planta en estudio no existen radiaciones ionizantes y no se va a considerar ambiente térmico debido a la suposición de que el aislamiento de los equipos y las conducciones es totalmente eficiente.

Por tanto el único riesgo físico que se va a considerar en la planta es el ruido, que además es uno de los riesgos más importantes en la industria (no tanto por la importancia de los efectos que produce sino por la frecuencia, es decir, la cantidad de casos de personas con problemas de audición a causa del ruido).

Los principales equipos que producen ruido son las bombas y los ventiladores debido a la fricción y movimiento mecánico. Además en las operaciones de mantenimiento y montaje se suele producir mucho ruido.

El ruido se puede definir como “un sonido articulado y confuso, cuya intensidad varía generalmente con el tiempo”, aunque no existen características físicas que puedan distinguir un sonido de un ruido (la consideración de qué es ruido y que no lo es, es algo muy subjetivo).

Un ser humano tiene capacidad para captar un sonido asociado a una onda de presión desde tan sólo 20  $\mu\text{Pa}$  hasta diez millones de veces este valor, valor correspondiente al umbral de dolor.

Los efectos que produce el ruido sobre el organismo son diversos, siendo especialmente negativos en el caso de exposiciones a ruidos intensos o prolongados. Estos efectos producen los siguientes síntomas:

- Aumento de la presión y ritmo cardíaco.
- Aumento de la tensión muscular.
- Aumento del metabolismo.
- Inhibición del aparato digestivo.
- Molestias psicológicas.

Además, de forma más específica puede generar los efectos que se enumeran a continuación:

- Pérdida auditiva temporal: tras una exposición prolongada a un ruido muy intenso. Es recuperable.
- Trauma acústico agudo: tras un ruido breve e intenso. Es recuperable.
- Hipoacusia acústica: tras exposiciones largas. Recuperación parcial.
- Sordera profesional: pérdida definitiva de parte de la capacidad auditiva.

Debido a estas consecuencias que presenta, será necesario llevar a cabo una medición de los ruidos que se producen en las distintas zonas de trabajo. Para la medida de este parámetro se suelen emplear sonómetros (miden variaciones de presión de sonido captadas por un micrófono, siendo los más usados por su sencillez), dosímetros (miden la “dosis de ruido”, medida de la cantidad sonora que alcanza a un trabajador en un periodo relativamente largo de tiempo) y analizadores de frecuencia (identifican las frecuencias principales de un ruido).

La Normativa actual en España sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido se encuentran recogidos en el Real Decreto 286/2006 por la cual se establece como valor máximo de exposición 87 dB (A) de “nivel diario equivalente” y los 140 dB (C) como pico, estableciendo distintas mediciones de recomendación y obligación cuando se sobrepasen los valores de 80 y 85 dB (A) y 135 y 137 dB (C).

Siguiendo esta normativa, es necesario la medida y el cálculo de los niveles de ruido existentes en cada zona de la línea de proceso y compararse con los niveles permitidos por ley. Si alguno de estos valores es superior al valor permitido, se deberán aplicar algunas o todas las medidas siguientes:

- Sobre la fuente:
  - ✓ Cambios en la rutina o método de trabajo.
  - ✓ Sustitución del equipo que genere el problema por otro menos ruidoso.
  - ✓ Reducir al máximo los impactos y fricciones.
  - ✓ Emplear lubricación adecuada.

- ✓ Emplear sistemas conductores de la vibración (amortiguadores).
- Sobre el medio de transmisión:
  - ✓ Aumentar la distancia existente entre la fuente y el receptor.
  - ✓ Realizar un tratamiento acústico del suelo, techo y paredes para absorber el sonido y reducir la resonancia.
  - ✓ Aislar acústicamente la fuente de ruido.
- Sobre el receptor:
  - ✓ Utilización de protecciones personales: tapones los cuales reducen de 10-20 dB y auriculares que reducen hasta 50dB.
  - ✓ Aislar al trabajador.
  - ✓ Realizar una rotación del personal para reducir tiempo de exposición.

### 20.2.3. Riesgo de incendio y explosión

El Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la seguridad y salud de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo describe como atmósfera explosiva la mezcla con el aire en condiciones atmosféricas, de sustancias inflamables en forma de gases, vapores, nieblas o polvos, en la que, tras una ignición, la combustión se propaga a la totalidad de la mezcla no quemada.

Como anteriormente se comentó, las corrientes con las que se opera en el proceso (la mezcla de metanol, hidrógeno y aire, y la mezcla de formaldehído, hidrógeno y aire) son altamente inflamables (la corriente de formaldehído en agua no es inflamable, sino que lo que es inflamable son los vapores que se desprenden, por lo que se debe tener las mismas precauciones). Sin embargo, como punto positivo, las presiones a las que se opera no son muy altas (prácticamente la atmosférica), lo que reduce el riesgo de explosión e incendio.

Las medidas a aplicar se dividen en dos grupos en función a la fase de desarrollo en la cual se encuentre el riesgo en:

- Medidas preventivas: encaminadas a evitar o reducir el riesgo de explosión o incendio antes de que ocurra.
- Medidas protectoras: las cuales se aplican cuando el riesgo de explosión es inminente, no se ha podido impedir que se den causas que desemboquen en explosión.

La medida preventiva principal que se va a proponer es impedir y evitar, en la medida de lo posible, la generación de atmósferas explosivas, además de evitar el contacto de las sustancias con aquellos compuestos con los cuales pueden provocar una reacción violenta que desemboque en una explosión.



Para ello, a lo largo del proceso se situarán:

- Controladores-reguladores de presión que, ante un aumento de la misma, conectan la corriente con la red de antorchas reduciendo el valor de la presión de la corriente por debajo de la establecida para el proceso (el aumento de la presión provoca un calentamiento, lo que puede acarrear una explosión química, o física si la presión es demasiado elevada para el equipo).
- Válvulas de desahogo de presión de seguridad.
- Discos de ruptura.
- Válvulas reductoras.
- Respiraderos en los tanques.
- Aislamiento de las conducciones de la planta con el fin de evitar posibles fugas.

Otras medidas preventivas para evitar incendios y explosiones son ubicar las unidades de operación respetando la distancia de seguridad que tiene que existir entre los diferentes equipos que trabajan a presión, y reducir el volumen de las sustancias inflamables almacenadas para disminuir las consecuencias que se derivarían en una posible explosión química. Es debido a esta razón por la cual los depósitos de almacenamiento del producto se han diseñado para un volumen de almacenamiento de una semana.

Si, a pesar de las medidas preventivas, se produce una fuga de material inflamable, es imprescindible que se sigan las medidas de protección para evitar su ignición. Estas medidas son:

- ✓ Para evitar se deberá evitar el contacto de la sustancia inflamable con una fuente de ignición. Las descargas electrostáticas producidas por los trabajadores o el entorno de trabajo actúan como fuentes de ignición, por lo que los trabajadores deben llevar calzado y ropa adecuada fabricada con materiales que no den lugar a descargas electrostáticas.
- ✓ Disponer de elementos de compartimentación horizontal que eviten la propagación horizontal del fuego.
- ✓ En el caso de derrame de fluido inflamable, eliminar toda fuente de ignición y recoger, en la medida de lo posible, el líquido (metanol o formaldehído) que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Absorber el líquido residual en arena o un absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro.
- ✓ La instalación de los equipos, los sistemas y sus dispositivos de conexión sólo se pondrán en marcha si el documento de protección contra explosiones indica que éstos pueden utilizarse de forma segura en presencia de atmósferas explosivas.
- ✓ Se dispondrá de las medidas necesarias que permitan reducir al máximo los riesgos que pueda sufrir el personal por los efectos físicos de la explosión o el incendio.

- ✓ Alertar a los trabajadores mediante señales ópticas y acústicas de alarma y desalojo en condiciones de seguridad antes de que se genere la explosión o el incendio. A su vez, se dispondrán y mantendrán en funcionamiento (y libres de obstáculos) las salidas de emergencia que permita al personal desalojar la zona afectada en condiciones de seguridad.
- ✓ Disponer de antemano un Plan de Emergencia y Evacuación que permita desarrollar el proceso con la máxima seguridad y el mínimo riesgo para la salud de los trabajadores.

Los equipos básicos de lucha contra incendios que se usan en una planta química permiten, desde apagar el fuego, confinar el incendio o reducir al máximo tanto su propagación como sus consecuencias.

Se situarán sistemas de protección contra incendios, instalándose de acuerdo con el Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.

Se emplearán extintores distribuidos a lo largo de la línea de proceso en número suficiente para que el recorrido real desde cualquier origen de evacuación hasta un extintor no supere los 15 metros de distancia. Se dispondrán de forma que puedan ser utilizados de forma fácil y rápida, y de manera que el extremo superior del extintor se encuentre a una altura sobre el suelo menor que 1,7 metros. Se emplearán diferente tipo de extintores para diferentes tipos de incendios (los tipos de incendio son A: combustibles sólidos, B: combustibles líquidos, C: gases inflamables y D: fuego eléctrico). Así se deberá poseer extintores de espuma para los fuegos tipo B (el metanol líquido, en nuestra planta) y extintores de polvo para fuegos eléctricos y para fuegos tipo C (la combustión del formaldehído, tanto gas como disuelto, sólo se puede detener con este tipo de extintores).

Se instalarán sistemas manuales de alarma de incendio junto a cada salida del área de incendios y la distancia máxima a recorrer desde cualquier punto hasta alcanzar un pulsador no debe ser superior a 25 metros. Deben encontrarse perfectamente señalizados.

Existirán además sistemas de comunicación de alarmas, cuya señal acústica transmitida debe ser diferenciable del resto de alarmas (riesgo químico por fugas, riesgo de incendio, etc., y dentro de las alarmas por riesgo de incendio, si es una “alarma por emergencia parcial” o una de “emergencia general”).

Se distribuirán a lo largo de la línea de proceso sistemas de hidrantes especiales, los cuales estarán localizados de forma que la zona que proteja cada uno sea la cubierta por un radio de 40 metros, medidos horizontalmente desde el emplazamiento del hidrante.

El caudal requerido y la autonomía de cada hidrante serán 3500 L/min durante 90 min. La presión mínima en las bocas de salida de los hidrantes será de 5 bar cuando se esté descargando caudal.

#### 20.2.4. Riesgo eléctrico

El riesgo eléctrico se define como “la posibilidad de que circule corriente eléctrica a través del cuerpo humano”. Esa corriente eléctrica debe tener una características para que se considere motivo de riesgo (si se encuentra por debajo de un umbral, la corriente no provocará daños).

Los riesgos principales derivados de los sistemas eléctricos provocan graves consecuencias para la salud y la seguridad de los trabajadores. La corriente eléctrica circulando por el cuerpo puede causar daños por tres motivos fundamentales:

- La corriente eléctrica altera los estímulos nerviosos que gobiernan el funcionamiento de los distintos órganos y aparatos del cuerpo. Es por ello que se producen contracciones involuntarias de los músculos que pueden afectar negativamente a dos funciones vitales para la supervivencia: la respiración y el ritmo cardíaco.
- La circulación de la corriente produce en todo soporte material un desprendimiento de calor que viene regido por la Ley de Joule. Esto se traduce en el cuerpo humano en quemaduras, que varían desde quemaduras superficiales en los puntos de entrada y de salida de la corriente hasta quemaduras profundas e incluso carbonización de tejidos.
- En el caso específico de la corriente continua, puede producirse la electrolisis de los fluidos corporales, en especial de la sangre. Esta electrolisis provoca la aparición de burbujas gaseosas en los vasos sanguíneos obstruyéndolos, hecho que se conoce como embolia.

Los riesgos eléctricos se puede clasificar según el tipo de contacto en:

- Riesgos derivados de un contacto directo.
- Riesgos derivados de un contacto indirecto.

Las medidas de seguridad contra los contactos directos tratan de prevenir los contactos peligrosos de las personas con las partes activas (es decir, contacto con equipos o instalaciones que están diseñadas para que circule la corriente eléctrica). Las medidas que se adoptan en la línea de proceso se recogen a continuación:

- ✓ Las subestaciones eléctricas estarán cerradas a toda persona no implicada en las tareas, declarándose zonas restringidas. Las zonas de prueba de bombas, motores y otros equipos donde sea factible establecer un área restringida, se vallarán y señalizarán para notificar sobre la realización de prueba e impedir la entrada de personal ajeno.
- ✓ Las partes activas de los equipos, herramientas y máquinas se encontrarán eléctricamente aislados.
- ✓ Todos los equipos y elementos que estén o hayan estado en tensión deberán desconectarse antes de realizar ningún trabajo sobre ellos. La desconexión se hará con corte visible, se inmovilizará con cerradura y candado y las partes activas se pondrán a

tierra. Además, todas las intervenciones sobre estos equipos requerirán la comprobación de ausencia de tensión.

Las medidas de seguridad contra riesgos indirectos (es decir, contacto con equipos o instalaciones que no están diseñados para que circule corriente eléctrica, pero que por algún fallo o avería, circula corriente eléctrica) se basan en alguno de estos tres principios: disposición que impida el paso de una corriente por el cuerpo humano, limitación de la intensidad que pudiera circular a un valor no peligroso, corte automático cuando se produzca una tensión de defecto. En el caso de la línea diseñada se adoptan las siguientes medidas de prevención contra los contactos indirectos:

- ✓ Todos los equipos deberán disponer de diferenciales de intensidad de la corriente que protegen al trabajador ante posibles riesgos eléctricos y encontrarse conectados a tierra.
- ✓ Los equipos, máquinas y herramientas sometidos a tensión estarán provistos de un aislamiento eléctrico suplementario.
- ✓ Se emplearán, en la medida de lo posible, tensiones de seguridad en los equipos (12 voltios para inmersión, 24 voltios para locales mojados y 50 voltios para locales húmedos)
- ✓ Separación entre el circuito de utilización de cada elemento del circuito de alimentación por medio de transformadores o grupos convertidores manteniendo aislados de tierra todos los conductos del circuito de utilización.
- ✓ Disponer de elementos magnetotérmicos que permitan cortar el suministro de la corriente en caso de que aumente notablemente la intensidad de la corriente que circula por el sistema.

#### **20.2.5. Riesgo en la manipulación de máquinas y herramientas de trabajo**

Los riesgos derivados del empleo de máquinas y herramientas en los lugares de trabajo pueden ser debidos a la naturaleza de la máquina en sí o al uso que se hace de la misma, siendo las lesiones más frecuentes que se suelen generar en los accidentes derivados de este tipo de riesgo: fracturas, amputaciones, heridas, cortes y quemaduras.

La ley de Prevención de Riesgos Laborales establece en el artículo 41 que los fabricantes, importadores y suministradores de maquinaria, equipos, productos y útiles de trabajo están obligados a asegurar que éstos no constituyan una fuente de peligro para el trabajador siempre que se instalen y utilicen en las condiciones, formas y para los fines recomendados por ellos.

Las medidas propuestas para prevenir los riesgos derivados del empleo de maquinaria en la planta son:

- ✓ Para cada unidad, equipo, máquina o herramienta se dispondrá de un conjunto de normas de utilización segura, indicando, a su vez, cual es el o los EPIs (Equipo de Protección Personal) más adecuados. Esta información se recogerá en un formulario, panel o lista que se situará en las cercanías o en la misma unidad, equipo, máquina o

herramienta de modo que sea accesible y visible para todo aquel que requiera el uso de los mismos.

- ✓ Todos los trabajadores tendrán las herramientas y máquinas idóneas para la realización de su tipo de trabajo.
- ✓ Revisar regularmente el estado de las máquinas y herramientas, reparando o desechando inmediatamente aquellas que se encuentren estropeadas.
- ✓ Los resguardos y protecciones de las máquinas y herramientas deberán encontrarse correctamente instalados antes de su puesta en funcionamiento, así como también los armarios y cuadros eléctricos que alimenten máquinas deben poseer las protecciones reglamentarias.
- ✓ Las máquinas sólo deben ser utilizadas por personal cualificado y autorizado para ello.
- ✓ La reparación de máquinas o herramientas se llevará a cabo en taller por medio del personal dedicado a tal fin.
- ✓ Iluminación conveniente de las zonas de trabajo con máquinas.
- ✓ Señalización de las zonas peligrosas.
- ✓ Para las operaciones de carga, descarga, limpieza, reposición o mantenimiento las máquinas deben pararse, bloquearse, señalizarse y comprobar que no existen riesgos en su manipulación.

#### **20.2.6. Riesgo en la línea de proceso**

Para reducir los riesgos que se pueden derivar de la actividad diaria en la línea de proceso, se deben establecer una serie de medidas que garanticen que el personal de trabajo quede protegido ante la aparición de posibles riesgos, implicando esto el desarrollo de medidas preventivas para disminuir los riesgos accidentales.

#### **Procedimientos para el arranque y la parada**

La planificación completa de una parada necesita de una preparación previa del equipo en cuestión y una preparación por parte de las unidades y departamentos que puedan verse afectados. El procedimiento estará recogido por escrito y deberá cumplirse con exactitud.

El proceso de parada implica detener el suministro de alimentación al proceso, llevar el equipo a las condiciones ambientales, extraer los residuos y limpiar de sustancias tóxicas los equipos, evacuar el agua e inspeccionar el equipo para la consiguiente entrada.

El proceso de arranque implica preparar de forma preliminar el equipo y disposición de los sistemas auxiliares, eliminar el aire, realizar pruebas de tensión y llevar la unidad hasta las condiciones de trabajo establecidas.

#### **Tareas de mantenimiento**

Cuando se lleven a cabo labores de mantenimiento será necesario aislar las tuberías de conexión a equipos y sistema de bombeo por medio de apantallamiento. Las válvulas también deben cerrarse y bloquearse. Los equipos eléctricos deberán tener los interruptores cerrados antes de recibir autorización para trabajar con ellos.

Las pruebas de gases se realizan a temperatura ambiente antes y durante las labores de mantenimiento en aquellos equipos en los cuales exista riesgo a causa de gases. Se detectarán las fugas y averías por medio de la instalación de equipos que registrarán de forma continua los resultados de las muestras de aire. En las zonas peligrosas y en sus inmediaciones queda terminantemente prohibido el uso de maquinaria que pueda generar chispas.

### **Medicina preventiva**

Todo el personal que comience a trabajar deberá pasar previamente el reconocimiento médico, el cual será repetido periódicamente (generalmente en la industria se realizan anualmente, pero debido al usarse formaldehído en la planta se recomendará que los reconocimientos sean semestrales). Este tiempo dependerá del grado de exposición a formaldehído de la persona en su puesto de trabajo, y los resultados del examen pueden utilizarse para evaluar la eficacia de los programas de protección sanitaria.

### **Higiene industrial**

Se llevaran a cabo estudios toxicológicos de los productos implicados en los procesos. También se desarrollaran programas de higiene industrial para controlar el entorno laboral.

#### **20.2.7. Riesgo en el almacenamiento de productos químicos**

La reglamentación española sobre el almacenamiento de sustancia químicas y sus instrucciones técnicas complementarias se encuentran recogidas en el Real Decreto 379/2001.

Los riesgos más significativos del almacenaje de productos químicos son explosiones, derrames y la propagación del agente químico, la generación de vapores y gases tóxicos e incendios.

Como ya se ha comentado, en la línea de proceso proyectado se dispone de tanques de almacenamiento de producto generado. Las medidas preventivas a abordar para minimizar los efectos derivados del almacenamiento de este tipo de sustancias químicas son:

- ✓ Existirá una distancia física entre la zona en la cual se encuentran situados los tanques de almacenamiento y los equipos de proceso, así como entre tanques contiguos. En el proceso, la disposición de equipos dentro del área de almacenaje se regirá de acuerdo con la especificación de Cepsa ESP-0200-1. Dicha norma dicta que la distancia mínima entre tanques contiguos no debe ser inferior al diámetro del mayor de los tanques empleados, y que la distancia entre la zona de depósitos y la primera unidad no será inferior a 20 metros.
- ✓ Señalización normalizada en el almacenamiento y en las conducciones de circulación de ambos fluidos, indicando con claridad la naturaleza de los mismos.
- ✓ Iluminación adecuada de la zona de almacenaje con el fin de facilitar las operaciones de manipulación de estas sustancias.

- ✓ Sistemas de prevención de derrames del material por rebosamiento dotando al equipo de sistemas de control automáticos de nivel (comentados en el **Apartado 19.2.2.** de la presente **Memoria Descriptiva**).
- ✓ Duchas y lavajos que deben instalarse en las inmediaciones de los lugares de trabajo, especialmente en las zonas de carga y descarga, sistemas de impulsión y zonas de toma de muestras. Éstos equipos no estarán a más de 10 metros de los puestos de trabajo, debiendo estar libre de obstáculos y convenientemente señalizados.
- ✓ Se instalarán sistema de venteo de tanques y los depósitos además poseerán respiraderos que evitarán la formación de vacío o presión interna y la consiguiente deformación de la carcasa.
- ✓ Se instalarán cubetos donde se alojarán los depósitos de almacenamiento. Dicho cubeto de retención debe tener una capacidad útil sea que sea como mínimo la capacidad del tanque o tanques contenidos en su interior. En el caso que se aborda, se dispone de un cubeto de retención para los tanques de almacenamiento de producto. El fondo del mismo presenta una pendiente del 1 por ciento permitiendo así que el líquido derramado se dirija al lugar de recogida y tratamiento de efluentes.
- ✓ Las paredes y los fondos del cubeto deberán estar fabricados en un material que garantice la estanqueidad de los productos durante el tiempo necesario previsto para su evacuación con un tiempo mínimo de cuarenta y ocho horas. La distancia entre la pared del cubeto y el primero de los tanques será como mínimo la altura del mayor de los tanques. En el caso de la línea proyectada supone un valor 22 metros. En el cubeto deberán existir accesos normales y de emergencia, señalizados, con un número mínimo de dos y situados de tal forma que no deba recorrerse una distancia mayor de 25 metros hasta alcanzar un acceso desde cualquier punto del interior del cubeto.

Las dimensiones de este cubeto de retención son un área de 6204'01 m<sup>2</sup>, con una altura de 0,75 m.

## CAPÍTULO 21: Mantenimiento

El mantenimiento es una parte fundamental en la industria debido a que la falta de éste o a uno bastante precario, puede conllevar a pérdidas económicas, accidentes, emisiones no deseadas al Medio Ambiente y al ambiente de trabajo, catástrofes (véase Bhopal o alguna otra catástrofe donde el pobre mantenimiento de las instalaciones fuera un factor clave), etc. El poseer un mantenimiento eficaz conlleva a la capacidad de producir con calidad, seguridad y rentabilidad.

Por ello, la industria necesita un mantenimiento eficaz en los equipos e instalaciones. Así se asegura el correcto funcionamiento de los equipos de producción y con ello se obtiene de ellos la máxima disponibilidad. El mantenimiento ha ido evolucionando en el paso del tiempo conforme la industria necesitaba un mantenimiento más efectivo y debido también a los avances técnicos. Así, se ha pasado de métodos puramente estáticos (a la espera de la avería) a métodos dinámicos (seguimiento funcional y control multiparamétrico) con el fin de predecir las averías en una etapa incipiente e incluso llegar a determinar la causa del problema y, por tanto, procurar erradicarla.

Se necesita un mantenimiento eficaz debido a que existe un elevado nivel de exigencia a causa de la economía globalizada, con mercados altamente competitivos y un entorno variable donde la velocidad de cambio sobrepasa frecuentemente la capacidad de respuesta.

El mantenimiento posee como objetivo fundamental garantizar la disponibilidad del equipo con una calidad de servicio óptima. Las técnicas modernas de verificación del estado de las instalaciones contribuyen a conseguir objetivo, permitiendo además, una disminución de los costes de producción mediante una adecuada selección métodos de mantenimiento.

Habitualmente se suele definir el mantenimiento como el conjunto de técnicas destinado a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta disponibilidad) y con el máximo rendimiento (García. S, 2003).

### 21.1. Funciones del mantenimiento

Las funciones básicas del mantenimiento que se van a considerar son (Gómez de León F.C., 1998):

- Mantener los equipos e instalaciones en condiciones operativas eficaces y seguras.
- Efectuar un control del estado de los equipos así como de su disponibilidad.
- Realizar los estudios necesarios para reducir el número de averías imprevistas.
- En función de los datos históricos disponibles, efectuar una previsión de los repuestos de almacén necesarios.
- Intervenir en los proyectos de modificación del diseño de equipos e instalaciones.



- Llevar a cabo aquellas tareas que implican la modificación del diseño de equipos e instalaciones.
- Instalación de nuevo equipo.
- Asesorar a los mandos de producción.
- Velar por el correcto suministro y distribución de energía.
- Realizar el seguimiento de los costes de mantenimiento.
- Preservación de locales, incluyendo la protección contra incendios.
- Gestión de almacenes.
- Tareas de vigilancia.
- Gestión de residuos y desechos.
- Establecimiento y administración del servicio de limpieza.
- Proveer el adecuado equipamiento al personal de la instalación.

El mantenimiento de la planta se iniciará a priori de la puesta en marcha mediante inspecciones y pruebas de los equipos que posee la instalación. Se emitirá un informe fechado que indique dicha inspección, en el cual se expondrán los resultados obtenidos y la necesidad de algún análisis más o algún arreglo antes de empezar a operar. Una vez puesto en marcha, el mantenimiento del sistema se planificará atendiendo a las componentes correctiva, preventiva y predictiva.

## **21.2. Tipos de mantenimiento**

La clasificación más aceptada de los tipos de mantenimiento es:

- Mantenimiento correctivo.
- Mantenimiento predictivo.
- Mantenimiento predictivo.
- Mantenimiento productivo total.

Todos estos tipos de mantenimiento se usan combinados para una mayor rentabilidad de la operación. A esta combinación se le denomina mantenimiento planificado, y consiste en la realización de una selección de los equipos que se van a ver sometidos a cada tipo de mantenimiento de la manera óptima posible.

A continuación se expondrán los diferentes tipos de mantenimiento anteriormente citados.

- **Mantenimiento correctivo**

En este tipo de mantenimiento se interviene sólo cuando el equipo ha fallado, por ello también se denomina mantenimiento “a rotura”. Por tanto, se trata de una actitud pasiva frente a la evolución del estado de los equipos en el tiempo, es decir, se espera a que la avería aparezca para actuar.

A pesar de que por pueda parecer una actitud despreocupada de atención a los equipos, en muchas ocasiones está plenamente justificado, sobre todo en equipos auxiliares (es decir, no están directamente relacionados con la producción) y en los que existe un bajo coste de los

componentes afectados. Sin embargo, si se adopta esta forma de mantenimiento se producirán una serie de inconvenientes:

- Las averías se producen generalmente de forma imprevista, lo que puede ocasionar trastornos en la producción, que pueden ir desde ligeras pérdidas de tiempo, por reposición de equipo o cambio de tarea, hasta la parada de la producción, en tanto no se repare o sustituya el equipo averiado.
- Las averías, al ser imprevistas, suelen ser graves para el equipo, con lo que su reparación suele ser costosa.
- Las averías son siempre, en mayor o menor medida, inoportunas, por lo que la reparación de los equipos averiados suele llevar más tiempo del previsto, ya sea por ausencia del personal necesario para su reparación, o ya sea por la falta de los repuestos necesarios.
- Por tratarse de averías inesperadas, el fallo podría venir acompañado de algún siniestro, lo que obviamente puede tener consecuencias muy negativas para la seguridad del personal o de las instalaciones.

- **Mantenimiento preventivo**

Este tipo de mantenimiento tiene como objetivo disminuir o evitar, en la medida de lo posible, la reparación de un equipo mediante una rutina de inspecciones periódicas y la reposición de los elementos que estén deteriorados, lo que se conoce como “las tres erres del mantenimiento”. Si la segunda y la tercera no se realizan, la primera es inevitable (Gómez de León. F.C, 1998).

En las inspecciones se desmonta total o parcialmente el equipo con la finalidad de revisar el estado de sus elementos, reemplazando aquellos que se estime oportuno a la vista del examen realizado.

El éxito de este tipo de mantenimiento depende fundamentalmente de la correcta elección del periodo de inspección. Un periodo demasiado largo conlleva el peligro de la aparición de fallos entre dos inspecciones consecutivas, en tanto que un periodo corto puede encarecer considerablemente el proceso productivo. El equilibrio se encuentra como solución óptima entre los costes procedentes de las inspecciones y los derivados de las averías imprevistas.

El gran inconveniente que presenta el empleo exclusivo de este tipo de mantenimiento es el coste de las inspecciones, es decir, el desmontar y revisar un equipo que está funcionando correctamente o la sustitución de elementos (como pueden ser los lubricantes, rodamientos, etc.) que no se encuentran en mal estado conlleva un coste. Además, sea cual sea el periodo de inspección que se haya fijado, no se elimina por completo la posibilidad de una avería imprevista, aunque cuanto menor sea dicho periodo, se reducirá la probabilidad de averías imprevistas.

- **Mantenimiento predictivo**

El mantenimiento predictivo surge como una respuesta a la necesidad de reducir los costes de los métodos tradicionales (correctivo y preventivo) de mantenimiento. Se le denomina también como “mantenimiento según estado o según condición”, y el fundamento en el que se basa es conocer el estado de los equipos en cualquier momento. Así es posible reemplazar los elementos cuando realmente no estén buenas condiciones operativas, eliminando las paradas por inspección innecesarias, y evitar las averías imprevistas mediante la detección de cualquier anomalía de operación y el seguimiento de su posible evolución.

La aplicación de este tipo de mantenimiento se basa en dos pilares fundamentales:

- ✓ La existencia de parámetros funcionales indicadores del estado del equipo.
- ✓ La vigilancia continua de los equipos.

Entre las ventajas más importantes de este tipo de mantenimiento pueden citarse las siguientes (Gómez de León. F.C, 1998):

- Detectar e identificar precozmente los defectos que pudieran aparecer, sin necesidad de parar y desmontar la maquina.
- Observar aquellos defectos que solo se manifiestan sobre la maquina en funcionamiento.
- Seguir la evolución del defecto hasta que se estime que es peligroso.
- Elaborar un historial de funcionamiento de la maquina, a través de la evolución de sus parámetros funcionales y su relación con algún defecto significativo: parada, revisión, lubricación, reemplazo de algún elemento, cambio en las condiciones de funcionamiento, etc.
- Programar la parada, para la corrección del defecto detectado, haciéndola coincidir con un tiempo muerto o una parada rutinaria del proceso de producción.
- Programar el suministro de repuestos y la mano de obra.
- Reducir el tiempo de reparación, ya que previamente se ha identificado el origen de la avería y los elementos afectados por la misma.
- Aislar las causas de los posibles fallos repetitivos y procurar su erradicación.
- Proporcionar criterios para una selección satisfactoria de las mejores condiciones de operación de la maquina.
- Aumentar la seguridad de funcionamiento de la maquina, y en general de toda la instalación.

Las dificultades a las que se enfrenta este tipo de mantenimiento provienen de los mismos principios en los que se basa:

- En primer lugar, no existe ningún parámetro funcional, ni siquiera una combinación de ellos, que sea capaz de reflejar exactamente el estado de una máquina, indicando de forma inmediata, mediante la aparición de signos identificadores, la presencia de un defecto incipiente, y además para todos los defectos posibles.

- En segundo lugar, no es viable una monitorización de todos los parámetros funcionales significativos para todos los equipos de una instalación.

Como consecuencia de las anteriores limitaciones pueden presentarse los siguientes inconvenientes:

- Que el defecto se produzca en el intervalo de tiempo comprendido entre dos medidas consecutivas.
  - Que un defecto no sea detectado con la medición y análisis de los parámetros incluidos en el programa.
  - Que aún siendo detectado un defecto, éste no sea diagnosticado correctamente o en toda su gravedad.
  - Que aún habiéndose realizado un diagnóstico correcto, no sea posible programar la parada de la máquina en el momento oportuno, y sea preciso asumir el riesgo de fallo.
- 
- **Mantenimiento productivo total (MPT)**

El mantenimiento productivo total intenta recoger y aplicar las tendencias más recientes en cuando a la planificación participativa integral de todas las tareas del mantenimiento, incluyendo las técnicas utilizadas y su gestión, la administración del mantenimiento, el control de los distintos índices asociados al funcionamiento de los equipos y al conjunto de las instalaciones (fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad), la calidad de la producción y, finalmente, su repercusión en la economía de la empresa. Por tanto, este tipo de mantenimiento implica a todos los estamentos y niveles de la producción, con una estructura de planificación jerárquica que, partiendo de los objetivos últimos de la explotación, vaya desglosándose en tareas concretas hasta llegar al operador y a las actuaciones específicas sobre cada máquina y componente de las instalaciones.

Mediante el MPT se intenta, pues, abarcar una visión más amplia del mantenimiento, que recoja todos aquellos aspectos que intervienen de alguna manera en la utilización de los equipos e instalaciones, y por tanto en la capacidad de producción.

### **21.3. Política de mantenimiento**

La política o estrategia de mantenimiento consiste en definir los objetivos técnicos y económicos específicos del servicio de mantenimiento, relativos a su responsabilidad sobre los equipos e instalaciones y encaminado a conseguir los objetivos generales de la empresa.

La puesta en práctica de una política de mantenimiento supone la aceptación de unos compromisos que afectan a los factores: humanos, técnicos y económicos.

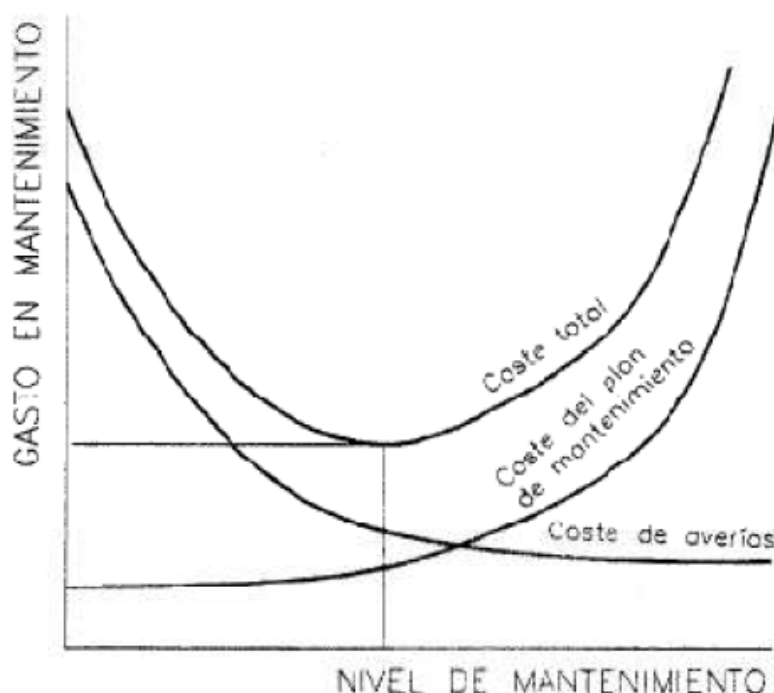
Los objetivos operacionales, económicos, sociales y de organización de mantenimiento que se van a seguir son:

- Llevar a cabo una inspección sistemática de todas las instalaciones, con intervalos de control para detectar cualquier desgaste o rotura, manteniendo los registros adecuados.
- Mantener permanentemente los equipos e instalaciones en su mejor estado, para así evitar los tiempos de parada que aumentan los costes.
- Efectuar las reparaciones de emergencia lo más pronto posible, empleando métodos sencillos de reparación.
- Prolongar la vida útil de los equipos e instalaciones al máximo.
- Proyectar mejoras en la maquinaria y equipos para disminuir las posibilidades de daño y rotura.
- Controlar los costes directos del mantenimiento mediante el uso correcto y eficaz del tiempo, materiales, mano de obra y servicios.
- Formación continuada a los profesionales del mantenimiento debida a la implantación de nuevos equipos, instalaciones, métodos de mantenimiento, etc.

#### 21.4. Costes de mantenimiento

Los gastos necesarios para poner en marcha un plan de mantenimiento pueden dividirse en las siguientes partidas (Gómez de León. F.C, 1998):

- Costes de la instrumentación, instalaciones y equipamiento necesario.
- Coste de las modificaciones pertinentes en los equipos y en la instalación existente.
- Coste del personal encargado de realizar la instalación del plan.
- Coste de la integración.
- Preparación y adiestramiento del personal encargado de ejecutar el plan.
- Coste del personal destinado a ejecutar el plan.
- Coste del mantenimiento del plan.



**Figura 21.1.** Costes de mantenimiento (Gómez de León, F.C., 1998)

Se puede observar en la figura anterior que al incrementar el grado de mantenimiento efectuado a la planta, evolucionan los costes de la inversión en el plan de mantenimiento (que obviamente aumentarán) y los costes derivados de las averías y reparaciones (que lógicamente disminuirán). La suma de ambos representa el gasto total en mantenimiento.

Como puede observarse, existe una zona donde el gasto total se minimiza. Con niveles de mantenimiento por debajo de este valor, se tendría que la inversión realizada es inferior a la que produciría el nivel de mantenimiento más rentable, mientras que con inversiones superiores a las del valor referido, no disminuirían de forma rentable los costes derivados de las averías y reparaciones. Por tanto, para cada instalación existe una inversión óptima en mantenimiento, por encima de la cual si bien los costes derivados de las averías y reparaciones siguen disminuyendo, no lo hacen en la misma proporción que la inversión requerida para ello, por lo que, en definitiva, dejan de ser rentables los incrementos realizados en la inversión en mantenimiento.

### **21.5. Plan de mantenimiento**

En todo proceso de desarrollo de un plan de mantenimiento, es decir, la programación de las tareas de mantenimiento a realizar, se deben realizar unas etapas. La primera de ellas es la realización de una lista con los equipos que existen en la planta.

A cada equipo hay que localizarlo (decir en qué área de la planta se encuentra), y después descomponerlos en elementos y componentes. Finalmente, se codifica cada equipo, y dentro de éste, los elementos de los que se compone. Esta codificación facilita su localización, inclusión en registros, permite que se realicen cálculos estadísticos de fallos, ya no solo del equipo en sí, sino de sus componentes, etc.

Finalmente, hay que jerarquizar los equipos por su importancia en la planta. Así, se destinarán las mayores partidas del mantenimiento en la conservación en buen estado de los equipos imprescindibles, después irán los equipos importantes, los poco importantes y por último los prescindibles.

Los criterios que se siguen para la jerarquización de los equipos ante las labores de mantenimiento son la influencia en la producción (si el fallo del equipo provoca una parada en la producción será muy importante, y si no produce grandes problemas será poco importante), la calidad (si el fallo del equipo altera sobremanera la calidad del producto de salida), la seguridad y el medio ambiente (si el fallo del equipo puede producir accidentes muy graves o graves daños en el medio ambiente) y el mantenimiento (si el fallo del equipo produce averías graves, frecuentes y caras).

Así, siguiendo los anteriores criterios, se clasifican los equipos en equipos tipo A, equipos tipo B o equipos tipo C:

**Tabla 21.1.**

Jerarquización de equipos en mantenimiento (García Garrido, 2003)

Tipo de equipo	Seguridad y medio ambiente	Producción	Calidad	Mantenimiento
A CRÍTICO	Puede originar accidente muy grave.	Su parada afecta al Plan de Producción.	Es clave para la calidad del producto.	Alto coste de reparación en caso de avería.
	Necesita revisiones periódicas frecuentes (mensuales).		Es el causante de un alto porcentaje de rechazos.	Averías muy frecuentes.
	Ha producido accidentes en el pasado.			Consumo una parte importante de los recursos de mantenimiento (mano de obra y/o materiales).
B IMPORTANTE	Necesita revisiones periódicas (anuales).	Afecta a la producción, pero es recuperable (no llega a afectar a clientes o al Plan de Producción).	Afecta a la calidad, pero habitualmente no es problemático.	Coste Medio en Mantenimiento.
	Puede ocasionar un accidente grave, pero las posibilidades son remotas.			
C PRESCINDIBLE	Poca influencia en seguridad.	Poca influencia en producción.	No afecta a la calidad.	Bajo coste de Mantenimiento.

Por último, jerarquizados ya los equipos, se detallan las medidas de mantenimiento que hay que realizar a cada equipo y su programación prevista.

## 25.6. Plan de mantenimiento del proceso

Al implantar un Plan de Mantenimiento se necesita realizar un análisis minucioso y pormenorizado de todos los detalles que implica la implantación de dicho plan para conseguir buenos resultados y para evitar que se tomen enfoques erróneos con respecto al tipo y al alcance del mantenimiento a aplicar en cada uno de los equipos.

Primeramente, una vez construida la línea de proceso de producción de formaldehído a partir de metanol, se realizará una base de datos que incluya todas las fichas técnicas de todos los equipos implicados, modificándose dicha base de datos y actualizándose en caso de cualquier cambio en el diseño, alguna reforma, la eliminación del equipo o modificación en el plan de mantenimiento.

### **21.6.1. Priorización de equipos**

Como se comentó anteriormente, con anterioridad a la elaboración del Plan de Mantenimiento será necesario decidir qué equipos entrarán en el programa de mantenimiento y que prioridad existe entre los equipos que existen en la línea de proceso. Por ello se va a clasificar los equipos atendiendo principalmente a su importancia en la operación de la línea de proceso y la importancia económica del equipo.

Así, se va a jerarquizar los equipos teniendo en cuenta si su fallo supone una parada de la operación en planta, una disminución en la capacidad productiva de la planta, una reducción de la calidad del producto o un peligro inminente. Por ello, primero se clasificarán los equipos atendiendo a su efecto sobre el proceso productivo:

- Categoría A: son los equipos esenciales para la producción, y su fallo provoca la parada o la pérdida inmediata de la producción. También se incluyen los equipos que afectan seriamente a las condiciones de seguridad de la planta. En la línea de proceso diseñada se incluyen en esta categoría los siguientes equipos:
  - Reactor
  - Columna de absorción
- Categoría B: son los equipos importantes para la producción, pero su fallo no provoca efectos inmediatos en la producción, aunque si el fallo no se arregla, los efectos que provocaría la persistencia del fallo sí podrían resultar perjudiciales para la producción o para la seguridad de la instalación. En este caso, los equipos que se incluyen en esta categoría son:
  - Intercambiadores de calor
  - Mezclador
- Categoría C: el resto de los equipos. En esta clase se incluyen:
  - Depósitos de almacenamiento
  - Bombas
  - Soplates

### **21.6.2. Mantenimiento de los equipos**

El mantenimiento que se va a usar en la planta es un equilibrio entre el mantenimiento preventivo y el predictivo, lo que constituye el mantenimiento planificado. Sin embargo se usará también el mantenimiento correctivo ante posibles averías. El mantenimiento predictivo se aplicará a todos los equipos de la línea de producción, incluidos los equipos de reserva.

El mantenimiento preventivo que se desarrollara para línea de producción diseñada será una simbiosis de un mantenimiento preventivo programado (consiste en la realización de ajustes, inspecciones y sustituciones periódicas de los equipos), un mantenimiento preventivo en paradas (consiste en una inspección de aquellos equipos en los que se ha detectado



desviaciones del comportamiento normal), y un mantenimiento preventivo legal (consiste en las inspecciones exigidas por ley).

Siempre se deben seguir las recomendaciones de los fabricantes y se debe establecer un cuadro de mantenimiento, el cual se debe cumplir con rigidez. Las operaciones principales de mantenimiento que se van a realizar a cada equipo se recogen a continuación:

### **Equipos de la categoría A**

#### **1. Reactor**

- Inspección anual para la limpieza de elementos internos, acondicionamiento de sistema y apertura del cabezal y de la placa.
- Debido a que se trabaja a altas temperaturas, se realizará una inspección semestral por ultrasonido para comprobar el efecto de la corrosión sobre el espesor del material y el estado de las soldaduras (a altas temperaturas la corrosión se ve favorecida).
- Limpieza exterior.
- Revisar las conexiones con las tuberías.
- Revisar el sistema de distribución del influente.
- Comprobar el estado del sistema de seguridad (válvula de alivio de presión de seguridad y disco de ruptura).
- Al encontrarse en el exterior, se protegerá con una nueva capa de pintura cada 5 años.
- Comprobar el estado del aislante.
- Reposición del catalizador anualmente.

En cuanto a la reposición del catalizador, se deben tener una serie de consideraciones. El catalizador no se regenera durante la operación, sino que tiene posee una vida útil de un año. Por ello se deberá sustituir anualmente coincidiendo con la parada anual de la línea de proceso para llevar a cabo las correspondientes inspecciones y reparaciones de equipos, instrumentación y red de tuberías. El catalizador será llevado a otra industria que será la encargada de su reposición, siendo tiempo requerido para esta reposición de aproximadamente unos cuatro días. Durante ese tiempo es necesario parar completamente las unidades de reacción llevándolas a las condiciones ambiente y limpiar los elementos internos del reactor. Después se repone el catalizador, se procede al proceso de activado del mismo, se preparará la unidad para su puesta en marcha y que se alcancen las condiciones normales de trabajo en el reactor. El proceso de descarga y carga del catalizador será desarrollado por una empresa externa especializada en dichos trabajos y autorizada para proceder a la gestión del residuo constituido por el catalizador que se repone.

La secuencia de operaciones a desarrollar para llevar a cabo la reposición del catalizador en el reactor se recoge a continuación:

1. Cortar la alimentación al reactor.
2. Llevar el sistema a las condiciones de operación atmosféricas.

3. Aislar el sistema del resto de los equipos y dejar pasar una corriente de nitrógeno con el fin de desplazar los restos de alimentación que pudiesen quedar en el sistema.
4. Desmontar el equipo y proceder a la limpieza exhaustiva de los elementos internos del reactor: tubos, juntas, cabezales y uniones.
5. Introducir el catalizador en el interior de los tubos del sistema. Una vez cargado, situar las mallas metálicas en el extremo de los tubos para evitar la salida de las partículas de catalizador.
6. Montaje de la unidad para llevar a cabo las operaciones de activación del catalizador.
7. Presurizar el equipo hasta alcanzar la presión de trabajo.
8. Suministrar la corriente de alimentación.
9. Poner en funcionamiento el sistema y, durante un par de días, proceder a la toma muestras del efluente del reactor para analizar la composición de la corriente producto.
10. Alcanzadas la composición deseada, acaba el proceso de reposición del catalizador.
11. A partir de este momento, el reactor trabajará en continuo, según las exigencias del proceso, hasta la nueva parada proyectada.

## **2. Columna de absorción**

- Inspección anual mediante las aperturas de las bocas de hombre para la limpieza de elementos internos y conocimiento de su estado.
- Limpieza exterior e interior.
- Revisar las conexiones con las tuberías.
- Reposición del relleno deteriorado o roto.
- Se realizará una inspección semestral por ultrasonido debido a que el formaldehído es un compuesto corrosivo, para comprobar el efecto de la corrosión sobre el espesor del material y el estado de las soldaduras.
- Revisar el sistema de distribución del influente.
- Comprobar el estado del sistema de seguridad (válvula de alivios de presión de seguridad y disco de ruptura).
- Comprobación del estado de la conducción que retorna a columna (recirculación de líquido).
- Al encontrarse en el exterior, se protegerá con una nueva capa de pintura cada 5 años.
- Comprobar el estado del aislante.

## **Equipos de la categoría B**

### **1. Intercambiadores de calor**

- Inspección anual para la limpieza de elementos internos, acondicionamiento del sistema y apertura del cabezal y de la placa.
- Debido a que se trabaja a altas temperaturas y con compuestos corrosivos, se realizará una inspección semestral por ultrasonido para comprobar el efecto de la corrosión sobre el espesor del material y el estado de las soldaduras.
- Limpieza exterior.

- Revisar las conexiones con las tuberías.
- Revisar el sistema de distribución del influente.
- Comprobar el estado del sistema de seguridad (válvula de alivio de presión de seguridad y disco de ruptura).
- Al encontrarse en el exterior, se protegerá con una nueva capa de pintura cada 5 años.
- Comprobar el estado del aislante.

## **2. Mezclador**

- Inspección semestral por ultrasonido para comprobar el efecto de la corrosión sobre el espesor del material y el estado de las soldaduras.
- Revisar las conexiones con las tuberías.
- Comprobación del estado de estanqueidad.
- Comprobación de los sistemas de seguridad y venteo.
- Inspección del aspecto superficial.
- Revisar el estado de la pantalla flotante.
- Al encontrarse en el exterior, se protegerá con una nueva capa de pintura cada 5 años.
- Revisar el estado del agitador, comprobándose si existe corrosión en el agitador.
- Comprobar las vibraciones del motor que mueve el agitador.
- Limpieza exterior.
- Engrase de los rodamientos.
- Control de arranque.
- Comprobar intensidades, potencias y tensiones.
- Comprobar la temperatura de los motores.

## **Equipos de la categoría C**

### **1. Depósitos de almacenamiento**

- Inspección semestral por ultrasonido para comprobar el efecto de la corrosión sobre el espesor del material y el estado de las soldaduras.
- Revisar las conexiones con las tuberías.
- Comprobación del estado de estanqueidad.
- Comprobación de los sistemas de seguridad y venteo.
- Inspección del aspecto superficial.
- Revisar el estado de la pantalla flotante.
- Al encontrarse en el exterior, se protegerá con una nueva capa de pintura cada 5 años.

### **2. Bombas**

- Control de arranque.
- Comprobar las vibraciones de los motores.
- Limpieza exterior.
- La presión en conexión con el conducto de impulsión.
- Comprobación de niveles de aceite.

- Comprobar la temperatura de los motores.
- Comprobación del ajuste de la bomba y el motor.
- Comprobación de estanqueidad.
- Puesta en marcha periódica de los equipos de reserva.
- Engrase de los rodamientos.
- Comprobar automatismos.
- Comprobar intensidades, potencias y tensiones.
- Tarar térmicos.

### **3. Soplates**

- Inspección anual para la comprobación del estado de los elementos internos, así como una inspección adicional siempre que se lleve a cabo una reparación.
- Reemplazar las piezas gastadas.
- Comprobar si existe alguna desviación en los elementos motrices.
- Examinar las piezas y las herramientas durante el montaje. Si existe contaminación debe lavarse y frotarse con un cepillo de bronce o de acero inoxidable.
- Comprobar el funcionamiento correcto de los controles y presiones de control, presiones y temperaturas de succión y de descarga, ruidos anormales y carga y temperatura del motor.
- Comprobación de niveles de aceite.
- Puesta en marcha periódica de los equipos de reserva.
- Comprobar intensidades, potencias y tensiones.
- Tarar térmicos.

## **Otros elementos**

### **1. Instrumentación en general**

Para asegurar la fiabilidad del funcionamiento de los aparatos de medición es esencial que la limpieza, mantenimiento y calibrado de los mismos sea correcta.

- Comprobar las conexiones.
- Comprobar la alimentación eléctrica.
- Comprobar la señal de entrada a los terminales.
- Comprobar la programación.

### **2. Sistema de tuberías**

- Antes de su puesta en servicio es necesario someterla a prueba de presión antes de ser consideradas aptos para su uso.
- Coincidiendo con la parada general de la línea de proceso, se procederá a la limpieza interna de la red de tuberías, con el fin de eliminar posible ensuciamiento o incrustaciones.

Debido a que se trabaja a altas temperaturas y con compuestos corrosivos para los metales, pueden aumentar los riesgos de corrosión, por lo que se someterán las tuberías a pruebas de ultrasonido semestrales o anuales, para estudiar la evolución del espesor y ver si se produce un deterioro o pérdida de espesor por corrosión.

### **3. Válvulas**

- Realizar revisiones periódicas con el fin de conocer el estado de las piezas que componen el interior de la válvula.
- Apretar los tornillos de la unión entre las distintas partes.
- Comprobar si están bien unidas todas sus partes.
- Controlar el ruido.
- Corregir problemas en el asentamiento e instalar nuevos discos o sellos de asiento en las válvulas que pueden repararse sin desmontar. Dentro de esta categoría se encuentran las válvulas de compuerta, globo y de retención.
- Para las válvulas de seguridad y alivio de presión y de reducción de presión deben tomarse además las siguientes precauciones: comprobar la presión de funcionamiento, verificar si hay corrosión o erosión, comprobar si existen partículas de sólidos entre el asiento y el disco, comprobar si existe vibración de la tubería o del recipiente protegido, así como que la válvula esté instalada en posición vertical.

### **4. Herramientas y máquinas**

- Revisar regularmente el estado de las herramientas y máquinas reparando o desechando aquellas que se encuentre deterioradas.

### **5. Mantenimiento de los extintores**

Cada tres meses:

- Es necesario comprobar su accesibilidad.
- Comprobación de carga (peso y presión).
- Estado de las partes mecánicas y comprobación del precinto.

El personal de la línea de proceso será el encargado de realizar estas actividades de mantenimiento. Cada año:

- Verificación de carga y presión.
- Estado completo: manguera, boquilla, válvula, etc.

Estas comprobaciones las realizará el fabricante de los extintores. Cada cuatro años:

- Prueba hidráulica (retimbrado), la cual será llevada a cabo por el fabricante.

### **21.7. Puesta en marcha**

La línea de proceso de producción está diseñada para funcionar durante 330 días al año. El resto del tiempo está planificado la parada general para la instalación de nuevos equipos, análisis y revisiones periódicas de dichos equipos, reposición del catalizador, limpieza profunda de equipos, etc. Después de la realización de todas estas tareas se necesitan ejecutar una serie de operaciones para acondicionar la planta a las condiciones normales de trabajo.

Como se habrá comprobado el correcto funcionamiento de todas las unidades y equipos auxiliares, será necesario preparar el reactor para alcanzar las condiciones requeridas en el transcurso de la reacción. Para ello, se procede de la siguiente forma:

En primer lugar se debe hacer pasar vapor de agua de alta presión a través de la carcasa del reactor. Una vez alcanzada la temperatura adecuada para el comienzo de la reacción, se introduce la alimentación de reactivos al sistema, de manera que transcurrido el periodo de tiempo oportuno, ésta ya se inicia por sí misma puesto que al ser una reacción fuertemente exotérmica, se genera la energía suficiente para poder prescindir del aporte de calor inicial que suponía el vapor de agua. En estas circunstancias el sistema se encuentra en condiciones normales de trabajo, por lo que será necesario empezar la refrigeración haciendo pasar agua de refrigeración del sistema de caldera a través de la carcasa.

## CAPÍTULO 22: Medio Ambiente

El Medio Ambiente es el conjunto de elementos físicos, químicos, biológicos y de factores sociales capaces de causar efectos directos e indirectos, a corto o largo plazo, en los seres vivos y en las actividades humanas.

El Medio Ambiente es la unidad de estudio más compleja que el ser humano se ha planteado ya que integra los tres niveles epistemológicos: abiótico, biótico y comportamental. Además, se caracteriza por su carácter dinámico, activo y cambiante.

Prácticamente todas las actividades humanas transforman el medio natural y provocan cierto grado de degradación Medio Ambiente. No obstante, algunas resultan particularmente importantes:

- **Agricultura y ganadería:** pérdida de bosques, aumento de la erosión y disminución de la producción de oxígeno. Desaparición de la flora y la fauna naturales. Impacto visual por la parcelación de los terrenos.
- **Pesca:** Disminución numérica, o incluso extinción, de diversas especies marinas.
- **Extracción de recursos:** erosión del terreno, contaminación del suelo y del subsuelo.
- **Industria:** contaminación atmosférica y de las aguas, lluvia ácida, gases de efecto invernadero.
- **Producción de energía:** Impacto visual, contaminación atmosférica (centrales térmicas), destrucción de ecosistemas terrestres (presas), generación de radiaciones y residuos muy peligrosos (centrales nucleares).
- **Urbanización e infraestructuras:** transformación del paisaje, pérdida de ecosistemas, erosión del terreno por obras diversas, contaminación atmosférica y de aguas, y generación de gran cantidad de residuos.

### 22.1. Definiciones de conceptos importantes

A continuación, se van a definir algunos conceptos importantes relacionados con el medio ambiente:

- **Contaminación:** La introducción por el hombre en el medio, directa o indirectamente de sustancias o de energía que tengan una acción nociva de tal naturaleza que pongan en peligro la salud del hombre, que cause daños a los recursos biológicos y a los ecosistemas que deteriore los bienes materiales, perjudique o menoscabe los lugares de esparcimiento u otros legítimos del medio ambiente.
- **Emisión:** Residuos que son emanados por la actividad humana, ya sea industrial o doméstica y que afectan al medio ambiente. Momento en el que los contaminantes salen del foco emisor.
- **Inmisión:** Recepción de contaminantes en el medio ambiente (aire, suelo, agua) procedentes de una fuente emisora. Frecuentemente el término se utiliza como

sinónimo de niveles de inmisión, que es la concentración de sustancias contaminantes en un medio determinado.

- Carga contaminante: Cantidad total de uno o varios contaminantes liberados al ambiente, directa o indirectamente, por una organización o grupo de organizaciones en un área dada, durante un cierto período de tiempo.

## 22.2. Normativa

- Ley 9/06, de 28 de abril, sobre Evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el Medio Ambiente.
- Ley 42/07, de 13 de diciembre, del patrimonio natural y de la biodiversidad.
- Ley 26/07, de 23 de octubre, de responsabilidad medioambiental.
- Real Decreto 1513/05, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la ley 37/03, de 17 de noviembre, del ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.
- Ley 27/06, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de Medio Ambiente.
- Ley 34/2007, de la Jefatura del Estado, de 15 de noviembre de 2007, de calidad del aire y protección de la atmósfera (Boletín oficial del Estado número 275 de 16 de noviembre de 2007)
- Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero (Boletín oficial del Estado. número 59 de 10 de marzo de 2005)
- Ley 15/2003, de 13 de junio, de modificación de la Ley 6/1993, de 15 de julio, reguladora de los residuos. (Boletín oficial del Estado número. 174 de 22 de julio de 2003)
- Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación. (Boletín oficial del Estado número. 157 de 2 de julio de 2002)
- Ley 5/2002, de 3 de junio, sobre vertidos de aguas residuales industriales a los sistemas de saneamiento. (Boletines oficial de Estado número. 170 de 17 de julio de 2002)
- Ley 38/1995, de 12 de diciembre, sobre el Derecho de acceso a la información en materia de medio ambiente. (Boletín oficial del Estado número. 297 de 13 de diciembre de 1995)
- Ley 6/2001, de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental. (Boletín oficial del Estado número. 111 de 9 de mayo de 2001)
- Ley 10/98, de 21 de abril, de residuos que traspone la Directiva 91/156/CEE.

## 22.3. Contaminación atmosférica

Se define la contaminación atmosférica como la presencia en la atmósfera de sustancias no deseables, en concentraciones, tiempo y circunstancias tales que puedan afectar



significativamente al confort, salud, y bienestar de las personas o al uso y disfrute de sus propiedades

El Consejo de Europa determina que existe contaminación en el aire cuando la presencia en él de una sustancia extraña o una variación importante en la proporción de las habitualmente presentes es capaz de provocar un efecto perjudicial o una molestia, teniendo en cuenta los conocimientos científicos del momento.

Los contaminantes atmosféricos se clasifican según su estado de agregación en:

- Gases: cuando ese es su estado físico en condiciones normales (1 atm y 25°C). Algunos ejemplos serían: óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono.
- Vapores: cuando su estado físico normal a 25°C y 1 atm es líquido o sólido y se encuentran dispersos en el aire a escala molecular. (Hidrocarburos ligeros)
- Aerosoles: es una dispersión de partículas sólidas o líquidas finamente divididas en un medio gaseoso. Tipos de aerosoles:
  - Aerosoles líquidos:
    - Niebla: suspensión de gotitas líquidas originadas por la condensación de vapor de agua sobre partículas suspendidas que actúan como núcleos de condensación.
    - Bruma: suspensión de gotitas líquidas originadas por condensación de vapores.
  - Aerosoles sólidos:
    - Polvo: suspensión de partículas procedentes de una disgregación, trituración o pulverización. De forma irregular, de tamaño comprendido entre  $10^{-3}$  y  $10^{-2}$   $\mu\text{m}$ .
    - Fibra: suspensión de partículas precedentes de una disgregación. Su longitud es cinco veces mayor que el resto de sus dimensiones.
    - Humo: suspensión de partículas procedentes de los productos residuales de la combustión o de los no quemados.

Otra clasificación interesante de los contaminantes atmosféricos es según su origen:

- Naturales: procedente de procesos de descomposición (biogénicos) y de la actividad volcánica (no biogénicos).
- Antropogénicos:
  - Contaminantes primarios: los que se vierten directamente a la atmósfera.
  - Contaminantes secundarios: se originan en la misma atmósfera por reacción entre dos o más contaminantes primarios o entre un contaminante primario y los constituyentes normales del aire.

Hay que prestar especial atención a los contaminantes secundarios, ya que su presencia en el medio da origen a la lluvia ácida, la contaminación fotoquímica, el efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono. Estos efectos causados por los contaminantes consisten en:

- Contaminación fotoquímica: consiste en la aparición de sustancias orgánicas fuertemente oxidantes e irritantes, originadas al reaccionar entre sí los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el oxígeno en presencia de radiación ultravioleta. Sus efectos son: la irritación de ojos, garganta y vías respiratorias, reducción de la visibilidad y daña la vegetación.
- Lluvia ácida: el  $\text{SO}_2$  y los óxidos de nitrógeno se oxidan por vía fotoquímica o catalítica, para dar ácido sulfúrico y ácido nítrico, respectivamente, los cuales se disuelven en el agua de la lluvia. Causa daño a la vegetación, la acidificación del agua en ríos y lagos modificando el pH del agua provocando la muerte de especies acuáticas y aumentando la solubilidad de algunos metales que pueden ser tóxicos, la acidificación de los suelos que afectaría a todo el ecosistema.
- Efecto invernadero: los rayos luminosos procedentes de la radiación del Sol al llegar a la Tierra atraviesan la atmósfera, que es sustancialmente transparente a ellos e interactúan con la materia. El 30% de la radiación se devuelve al espacio y el 70% restante, después de numerosas interacciones, calienta la materia. La materia emite a su vez energía, pero en longitudes de ondas superiores. En las capas bajas de la atmósfera existen gases que absorben la radiación infrarroja convirtiéndola en calor, por lo que ésta no se emite fuera de la Tierra. Se forma una capa protectora del calor que origina temperaturas templadas en la superficie terrestre, al impedir su enfriamiento. La presencia en la atmósfera de vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el protóxido de nitrógeno, el ozono y los CFCs, absorben la radiación infrarroja de la atmósfera, provocando el calentamiento de la tierra y el aumento de la temperatura media del planeta.
- Destrucción de la capa de ozono: los óxidos de nitrógeno emitidos por aviones supersónicos y aeronaves espaciales y los átomos libres de Cl generados por las reacciones que experimentan los CFC cuando se dispersan en la atmósfera, desplazan las reacciones cíclicas de formación y destrucción del ozono hacia la destrucción del ozono. Esto origina la disminución de la capa de ozono en todo el mundo. Su efecto es que permite la llegada a la tierra de una mayor proporción de radiación ultravioleta (problemas cancerígenos). También afectaría la química de la troposfera, las cosechas y los ecosistemas acuáticos.

#### 22.4. Contaminación de las aguas

El hombre, es el principal causante de la contaminación del agua, ya que la eliminación de residuos líquidos, domésticos e industriales, así como desperdicios sólidos como la basura, en los ríos y otros cuerpos de agua, trae como consecuencia su inutilización. La misma naturaleza es fuente de contaminación por el arrastre del suelo y capas vegetales, debido a la deforestación incontrolada.

Los efectos más comunes producidos son los siguientes:

- Efectos Físicos: como mal olor, cambio de color, enturbiamiento, fermentación, cambio de temperatura...

- Efectos Químicos: como la disminución de la concentración necesaria de oxígeno para la vida acuática.
- Efectos Biológicos: como la muerte de plantas y animales, así como la producción de enfermedades en el hombre.

Un problema que causa la contaminación del agua en la eutrofización, que es el enriquecimiento de nutrientes en un ecosistema acuático. Comienza cuando el agua recibe un vertido de nutrientes, como desechos agrícolas y forestales, lo cual hace que favorezca el crecimiento excesivo de materia orgánica, provocando un crecimiento acelerado de algas y otras plantas verdes que cubren la superficie del agua y evita que la luz solar llegue a las capas inferiores. Como consecuencia de esto, el agua se enturbia, y al disminuir la cantidad de luz, la vegetación se muere al no poder realizar la fotosíntesis, generando que otros microorganismos, como las bacterias, se alimenten de la materia muerta, consumiendo el oxígeno que necesitaban peces y moluscos, y a la vez generar algas tóxicas y microorganismos patógenos que podrían causar enfermedades. Las causas son: la contaminación urbana, atmosférica, agropecuaria y la forestal.

Principales contaminantes del medio acuático son:

- Contaminantes físicos: presencia en un sustrato de formas de energía que exceden a los niveles basales. Algunos tienen efecto a largo plazo, por lo que la asociación causa-efecto es muy sutil y difícil de establecer.
- Contaminantes químicos:
  - Los contaminantes inorgánicos, como cloruros, compuestos del nitrógeno, los compuestos del fósforo, los compuestos del azufre y los metales pesados. Algunos de estos elementos metálicos son micronutrientes, y necesarios para el desarrollo de los organismos vivos, pero al exceder de una determinada concentración resultan tóxicos. Los principales metales pesados son: Fe, Al, Pb, Cu, Hg, etc.
  - Contaminantes orgánicos: formados por C, H y O. Suelen ser microcontaminantes, es decir, sustancias que se encuentran en pequeña concentración, pero cuyos efectos en el medio son amplios. Pueden ser de origen natural o sintético. Entre ellos se puede citar:
    - Tensioactivos: compuestos orgánicos que poseen una parte hidrofóbica y otra hidrofílica, lo que hace que se concentren en la interfase agua-aire y disminuir la tensión superficial del agua. Sus efectos nocivos son la aparición de espumas, no son biodegradables, son tóxicos y dificultan la oxigenación del agua a través de la interfase aire-agua.
    - Pesticidas: sintéticos o naturales, que sirven para combatir los agentes responsables de las plagas. Se introducen en el medio hídrico por escorrentía superficial, infiltración hacia las aguas del subterráneas, introducción directa en el momento de la aplicación y vertidos. Presentan una baja solubilidad en agua por lo que se acumulan sobre las partículas sólidas y a depositarse en los sedimentos. Sus efectos

nocivos son la baja biodegradabilidad, la toxicidad elevada y la bioacumulación.

- Compuestos aromáticos persistentes: los PCBs y PAHs son compuestos resistentes a la hidrólisis, la biotransformación y al menos a la fotodegradación, poco solubles y volátiles. Se acumulan en sedimentos y se incorporan a los tejidos animales, por lo que son bioacumulativos. Presentan propiedades cancerígenas
- Contaminantes biológicos: cuando un microorganismo se encuentra en un sustrato al que no pertenece o si pertenece está en concentraciones que exceden a las naturales. Presentes en lugares cuyas condiciones higiénicas son deficientes. Los patógenos son los principales responsables de la contaminación biológica del agua y han causado grandes epidemias en la humanidad.

## 22.5. Residuos

Los residuos se definen como los productos de desecho sólido, líquido y gaseoso generados en actividades de producción y consumo, que ya no poseen valor económico por la falta de tecnología adecuada que permita su aprovechamiento o por la inexistencia de un mercado para los posibles productos a recuperar (OCDE).

Según la Ley 10/98 de residuos estos se clasifican en:

- Residuos urbanos: los generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, así como todos aquellos que no tengan la calificación de peligrosos y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades. Estos residuos a su vez se clasifican en:
  - Domiciliarios:
  - Específicos:
    - Lodos de depuradoras.
    - Residuos de construcción y demolición.
    - Neumáticos y vehículos fuera de uso.
    - Residuos voluminosos-
    - Residuos de matadero, decomiso, productos cárnicos y animales muertos.
    - Pilas y acumuladores usados.
- Residuos peligrosos: los materiales sólidos, pastosos, líquidos, así como los gaseosos contenidos en recipientes, que siendo el resultado de un proceso de producción, transformación, utilización o consumo, su productor los destine al abandono y contengan en su composición algunas de las sustancias y materias que figuran en el Anexo de la Ley en cantidades o concentraciones tales que representen un riesgo para la salud humana, recursos naturales y medio ambiente.

La recuperación de los residuos es la valorización de los elementos extraídos de materiales destinados al abandono (residuos) mediante diferentes medios o técnicas. La recuperación se produce vía reciclado o vía reutilización:

- Reciclado: proceso por el cual se recuperan los componentes de los residuos, devolviéndolos al mismo ciclo que los ha producido.

Las etapas del proceso de reciclaje son: selección, compactación, transporte y el procesado final que proporciona la materia prima para los fabricantes o bien, un producto final. Las ventajas del reciclaje son la conservación de los recursos naturales y el ahorro de espacio en el vertedero. El éxito de un programa de reciclaje depende de una fuerte demanda de los materiales recuperados y de un valor de mercado de los materiales que cubran los costos de energía y transporte.

- Reutilización: proceso por el que se recuperan los componentes de los residuos para devolverlos a otros ciclos diferentes a los que se los generan.

Para llevar a cabo los procesos de reciclaje y reutilización es necesaria una infraestructura de recogida adecuada que resulta muy costosa y hay que tener en cuenta las necesidades del mercado para los materiales recuperados. El mercado depende de la calidad de los materiales, los costes de las materias primas en competencia y la capacidad global de la industria para utilizarlos.

Los objetivos de la recuperación son la minimización de los efectos contaminantes en agua, aire y suelo y el aprovechamiento de los elementos valorizables que están contenidos en los residuos.

Otra opción para el tratamiento de los residuos, es la incineración, que es una técnica de valorización y/o eliminación parcial de residuos basada en la combustión controlada de los mismos por descomposición térmica mediante oxidación con aire y desprendimiento de calor. El calor de los gases formados, es recuperado en una caldera en forma de vapor directamente utilizable o bien transformable en electricidad a través de un turboalternador. Se produce una disminución del volumen y el peso de los residuos, generando un residuo de escorias y cenizas, se reduce el total de los residuos en un 30%. Las incineradoras tienen el inconveniente de que cuentan con una gran oposición social.

Como última opción, cuando no es posible ni la recuperación ni la valorización de los residuos, se procede almacenamiento de residuos en vertedero.

Un vertedero es una zona de almacenamiento de residuos sobre el terreno, dispuesto de tal forma que se eviten molestias y riesgos sobre la salud pública, durante las operaciones de vertido y después de la clausura. Debe controlarse qué tipo de residuos se almacenan, como se realiza dicho almacenamiento y el lugar donde se vierten para que el impacto ambiental de la instalación sea el menor posible. Elegir una correcta ubicación es indispensable para el buen funcionamiento del vertedero, para evitar la contaminación de las aguas subterráneas por los lixiviados generados, el suelo y el aire. Los vertederos se deben construir para tener una

capacidad ó vida útil en torno a 20 años. Una vez agotada la capacidad de un vertedero controlado, éste debe ser clausurado y sellado. La entidad explotadora será responsable de su mantenimiento, vigilancia y control. En la mayoría de los casos la zona se emplea posteriormente para repoblación forestal.

## **22.6. Ruido**

El ruido ha sido definido desde el punto de vista físico como una superposición de sonidos de frecuencias e intensidades diferentes, sin una correlación de base. Fisiológicamente se considera que el ruido es cualquier sonido desagradable o molesto.

El ruido desde el punto vista ocupacional puede definirse como el sonido que por sus características especiales es indeseado o que puede desencadenar daños a la salud.

La presencia del sonido es consustancial en nuestro entorno y forma parte de los elementos cotidianos que nos envuelven. Pero el sonido se puede convertir en el agresor del hombre en forma de ruido, es un contaminante de primer orden y puede generar unas patologías específicas.

Algunos de los principales efectos de la presencia del ruido ambiental y la exposición al mismo, sobre diferentes especies son el abandono del hábitat, el enmascaramiento de importantes señales de comunicación entre individuos de la misma especie, la degradación del ambiente sonoro natural de importancia de muchos animales, la pérdida parcial o permanente de la audición, y hasta la muerte. El efecto del ruido sobre la fauna también puede ocasionar estrés y generar efectos metabólicos, hormonales, y en la conducta.

## **22.7. Evaluación de impacto ambiental**

La evaluación de impacto ambiental es un proceso de análisis o procedimiento administrativo que introduce la variable ambiental en la toma de decisiones sobre los proyectos con incidencia importante en el medio ambiente.

La evaluación de impacto ambiental es uno de los instrumentos de la política ambiental con aplicación específica e incidencia directa en la actividad productiva, que permite plantear opciones de desarrollo que sean compatibles con la preservación del medio ambiente y la conservación de los recursos naturales.

Analizará los aspectos directos e indirectos de cada una de las propuestas de actuación sobre la población humana, la flora, la fauna, el suelo, el aire, el agua, el clima y el paisaje y la estructura y función de los ecosistemas previsiblemente afectados. Además, estimará los efectos sobre los bienes materiales, el patrimonio cultural, las relaciones sociales, las condiciones de sosiego público (ruidos, vibraciones, olores y emisiones luminosas) y la de cualquier otra incidencia ambiental relevante derivada del desarrollo de la actuación en el Medio Ambiente.

Entre las principales características de la evaluación de impacto ambiental son:

- Es un instrumento que tiene carácter preventivo.
- Se aplica en obras o actividades humanas.
- Su objetivo es prevenir los efectos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente que pudieran derivarse del desarrollo de una obra o actividad.
- Basa su efectividad en un análisis prospectivo-predictivo.
- Establece regulaciones a las obras o actividades sujetas a la evaluación.
- Es un procedimiento integrador de diversas disciplinas científicas.

La línea de proceso descrita en el actual Proyecto Fin de Carrera debe estar sujeta a Evaluación de Impacto Ambiental ya que se encuadra dentro de la siguiente categoría de grupo, al diseñarse para producir metanol y formaldehído los cuales son productos químicos orgánicos básicos de la industria derivada del gas natural:

Industria química, petroquímica, textil y papelera

- a. Instalaciones químicas integradas, es decir, instalaciones para la fabricación a escala industrial de sustancias mediante transformación química, entra la que se encuentran yuxtapuestas varias unidades vinculadas funcionalmente entre sí, y que se emplean para:
  1. La producción de productos químicos orgánicos básicos.
  2. La producción de productos químicos inorgánicos básicos.
  3. La producción de fertilizantes a base de fósforo, nitrógeno o potasio (fertilizantes simples o compuestos).
  4. La producción de productos fitosanitarios básicos y de biocidas.
  5. La producción de productos farmacéuticos básicos mediante un proceso químico o biológico.
  6. La producción de explosivos.
- b. Tuberías para el transporte de productos químicos con un diámetro de más de 800 milímetros y una longitud superior a 40 kilómetros.
- c. Instalaciones para el almacenamiento de productos petroquímicos o químicos, con una capacidad de, al menos, 200.000 toneladas.
- d. Plantas para el tratamiento previo (operaciones tales como el lavado o blanqueo) o para el teñido de fibras y productos textiles cuando la capacidad de tratamiento supere las 10 toneladas diarias.
- e. Plantas para el curtido de pieles y cueros cuando la capacidad de tratamiento supere las 12 toneladas de productos acabados por día.
- f. Plantas industriales para:
  1. La producción de pasta de papel a partir de maderas u otras materias fibrosas similares.
  2. La producción de papel y cartón, con una capacidad de producción superior a 200 toneladas diarias.
- g. Instalaciones de producción y tratamiento de celulosa con una capacidad de producción superior a 20 toneladas diarias.

El organismo ambiental competente, al tratarse de un proyecto cuya repercusión no sobrepasa el ámbito territorial de Andalucía, será aquel que determine la Comunidad Autónoma de Andalucía.

#### **22.7.1. Evaluación de impacto ambiental de la línea de proceso**

##### **Residuos sólidos:**

El único residuo sólido que produce la planta es el catalizador del reactor que se repone cada año. Existe una empresa llamada BEFESA que trata este catalizador para su reutilización, por tanto se enviará a ésta instalación el catalizador agotado.

Otros residuos sólidos que se pueden generar en la planta son los materiales de mantenimiento, reparación, cambio de equipos, etc. aunque estos materiales serán de mucha menor importancia debido a su poca cantidad y a los pocos efectos que producen en el Medio Ambiente. Aún así, los metales se llevarán a empresas que gestionan su reciclado y los polímeros serán reciclados si es posible (en caso de no poder realizarse, se enviarán a una empresa que se encargue de su eliminación (incineración, vertido controlado, etc.). Así, se ha escogido como empresa receptora de los residuos DELTA.S.A.

##### **Residuos líquidos:**

En la planta, considerando las corrientes principales de reactivo y producto, no se generan vertidos líquidos debido a que se disponen de las medidas de seguridad para evitar vertidos accidentales que puedan ocasionar daños tanto en la salud de los trabajadores como en el Medio Ambiente.

Si existe algún vertido accidental, será almacenado y analizado posteriormente, y dependiendo de qué sea el vertido, será enviado a una empresa gestora de residuos o se tirará al desagüe (en el caso de que sea agua de proceso).

Las corrientes de agua del proceso, (refrigeración y calefacción) retornarán de nuevo al circuito cerrado de la red de agua de la planta, donde se le someterá a las operaciones de descontaminación y adecuación para los fines deseados. El agua de purga será eliminada por el desagüe debido a tener efectos adversos sobre el Medio Ambiente.

Con respecto a los aceites lubricantes de los equipos mecánicos (bombas, soplantes, etc.), debido a los efectos adversos sobre el Medio Ambiente, serán enviados a una planta de tratamiento externa.

##### **Emisiones atmosféricas:**

En la planta existen dos tipos de emisiones atmosféricas, la de la absorción y las emisiones por fugas. Debido a la temperatura a la que se opera y a que la mayoría de sustancias empleadas son gases a esas temperaturas, pueden existir fugas. Aunque se evitarán en la medida de lo



posible mediante las medidas de seguridad pertinentes, tanto por tener efectos adversos sobre la salud de los trabajadores como sobre el Medio Ambiente, siempre existirán. Por ello se dispondrá de campanas extractores en diferentes puntos de la planta que recojan estas emisiones y las envíen a una antorcha para su posterior eliminación.

Otro tipo de fugas son las debidas a las válvulas de ruptura, los discos de choque, etc. cuando actúan para aliviar la presión. Estas fugas serán recogidas y serán enviadas a la misma red de eliminación de emisiones comentada anteriormente.

La columna de absorción A-01 posee una salida de gases, la cual contiene en su mayoría aire (en un 98%), pero existen trazas de hidrógeno y formaldehído. Esta corriente será llevada a una antorcha para su combustión debido a que estos gases son perjudiciales para el Medio Ambiente (y el formaldehído para la salud de las personas también).

Por tanto, debido a que todas las emisiones serán incineradas, las emisiones de la planta serán agua y CO<sub>2</sub>. El agua no posee efectos adversos, pero el dióxido de carbono sí, pero estos efectos son mucho menores al del resto de gases que se emitirían si no se produjera esta combustión. Además, al ser la cantidad de fugas y la cantidad de gases combustibles en la corriente de salida gaseosa del absorbedor muy pequeña, la cantidad emitida de CO<sub>2</sub> será bastante reducida.

## BIBLIOGRAFÍA:

### Libros:

- Acedo Sánchez, J., 2006. *Instrumentación y Control avanzado de Procesos*. Díez de Santos: Instituto Superior de la Energía.
- Arpe, H.J. y Weissermel, K., 1981. *Química Orgánica Industrial: Productos de partida e Intermedios más importantes*. Barcelona: Reverté.
- Branan Carl., 2000. *Rules of Thumb for Chemical Engineers*. 3ª Edición. GPP Ediciones.
- Coulson & Richardson's, 1988. *Ingeniería Química, Operaciones Básicas*. Editorial Reverté.
- Douglas J.F., 1991. *Problemas Resueltos de Mecánicas de Fluidos*. Madrid: Ed. Bellisco.
- Douglas, J.M., 1988. *Conceptual Design of Chemical Processes*. New York: Mc. Graw-Hill.
- Froment G.F., Waugh K.C., 2001. *Reaction Kynetics and the Development and Operation of Catalytic Processes*. Amsterdam: Elsevier.
- García Garrido, Santiago, 2003. *Organización y Gestión Integral de Mantenimiento*. Madrid: Ed. Díaz de Santos S.A.
- Gómez de León, F.C., 1998. *Tecnología del Mantenimiento Industrial*. Murcia: Servicio de Publicaciones de Murcia.
- Greene, Richard W., 1987. *Válvulas: selección, uso y mantenimiento*. México: Mc. Graw-Hill.
- Harriot P., Mc Cabe L. y Smith Julián C., 2006. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Mc. Graw-Hill.
- Hollmans Mills, J., 1998. *Transferencia de calor*. Ed. Mc. Graw-Hill.
- Incropera Frank P. & DeWitt,. 2006. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6ª Edición, Nueva York: John Wiley and Sons.
- Jiménez Gutiérrez, Arturo, 2003. *Diseño de Procesos en Ingeniería Química*. Barcelona: Ed. Reverté.

- Kern, D.Q., 1999. *Procesos de Transferencia de Calor*. México: Compañía Editorial Continental.
- Levenspiel, 2006. *Ingeniería de las reacciones Químicas*. 3ª Edición. México: Limusa Wiley.
- Manson, 1996. *Catalyst Handbook*. 2ª Edición. Londres.
- Megyesy, E.F., 2001. *Manual de Recipientes a Presión. Diseño y Cálculo*. Ed. Limusa.
- Mendia Urquiola, F., 1994. *Equipos de intercambio de calor*. Bilbao: Ente Vasco de la Energía.
- Othmer, Kirk., 1985. *Concise Encyclopedia of Chemical Technology*. New York: Wiley.
- Perry, H., Green, R.W., y Maloney, O.J., 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 4ª Edición. Madrid: Ed. McGraw-Hill.
- Peters and Timmerhaus, 1991. *Plant design and economics for chemicals engineers*. 4ª Edición. Boston: Mc. Graw-Hill.
- Rase. H. F., 1963. *Piping Design for process plants*. Ed. John Wiley and sons.
- Reid, Prausnitz and Sherwood, 1977. *The properties of gases and liquids*. 3ª Edición. Londres: Mc. Graw-Hill.
- Rudd D.F., y Watson Ch.C. 1976. *Estrategias en Ingeniería de Procesos*. Alhambra Editorial.
- Santamaría Jesús M., Herguido J., Menéndez, M.A., y Monzón A., 2002. *Ingeniería de los Reactores*. España: Editorial Síntesis.
- Smith, Robin, 1995. *Chemical Processes Design*. Mc. Graw-Hill.
- Speight, J.G., 2002. *Chemical and Process Design Handbook*. Nueva York: Mc. Graw-Hill Handbooks.
- Wittcoff, H.A., y Reuben, B.G., 2002. *Productos Químicos Orgánicos Industriales. Tecnología, Formulaciones y Usos*. México: Noruega Editores.

#### **Revistas, Artículos y Otras Publicaciones de Investigación:**

- Tesser R., Di Serio M., Santacesaria E., 2003. Catalytic Oxidation of Methanol to Formaldehyde: an Example of Kinetics with Transport Phenomena in a Packed-Bed Reactor. *Catalysis Today*, 77, p. 325-333.

- Vieira Soares A. P., Farinhna Portela M., Kienneman A., 2005. Methanol Selective Oxidation to Formaldehyde Over Iron-Molybdate Catalyst. *Catalyst Reviews*, 37, p. 125-174.
- Josef Gerhardus Maria Winkelman, 1961. Absortion of Formaldehyde in Water. *Rijksuniversiteit Groningen*. Tesis Doctoral.
- G. Fagherazzi, N. Pernicone, 1970. Structural Study of a Methanol Oxidation Catalyst. *Journal of Catalysis*, 16, p. 312–235.
- Castelão-Dias, M., Costa, B.F.O., y Quinta-Ferreira, R.M., 2001. Fe Mössbauer Studies in Mo-Fe Supported Catalysts. *Hyperfine Interactions*, 136, p. 9.

**Páginas web:**

- ABB España [Internet]. Disponible en Web: [www.abb.es](http://www.abb.es) [Consultado el 4 de Enero de 2010].
- Aerzen Ibérica S.A. [Internet]. Disponible en Web: [www.aerzen.es](http://www.aerzen.es) [Consultado el 13 de Enero de 2010].
- Air Liquide Spain [Internet]. Disponible en Web: [www.es.airliquide.com](http://www.es.airliquide.com) [Consultado el 28 de Enero de 2010].
- Base de Datos de Comercio Exterior [Internet]. Disponible en Web: [www.aduanas.cameras.org/](http://www.aduanas.cameras.org/) [Consultado el 25 de Febrero de 2010].
- Energía, la Guía de la energía. [Internet]. Disponible en Web: [www.energuia.com/es/tarifas\\_gas.aspx](http://www.energuia.com/es/tarifas_gas.aspx) [Consultado el 5 de Febrero de 2010].
- Formaldehyde Council [Internet]. Disponible en Web: [www.formaldehyde.org](http://www.formaldehyde.org) [Consultado el 23 de Diciembre de 2009].
- Hexion Specialty Chemical [Internet]. Disponible en Web: [www.hexion.com](http://www.hexion.com) [Consultado el 1 de Marzo de 2010].
- IHS Global Insight [Internet]. Disponible en Web: [www.ihsglobalinsight.com](http://www.ihsglobalinsight.com) [Consultado el 1 de Marzo de 2010].
- Instituto de meteorología. [Internet]. Disponible en Web : [www.aemet.es](http://www.aemet.es) [Consultado el 14 de Febrero de 2010].
- Instituto de Recursos Natrales y Agrobiología. [Internet]. Disponible en Web: [www.irnase.csic.es/users/microleis/gibraltar/informes/Informe\\_VI.pdf](http://www.irnase.csic.es/users/microleis/gibraltar/informes/Informe_VI.pdf) [Consultado el 14 de Febrero de 2010].

- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo [Internet]. Disponible en Web: [www.insht.es/](http://www.insht.es/) [Consultado el 20 de Febrero de 2010].
- Kobold [Internet]. Disponible en Web: [www.kobold.com](http://www.kobold.com) [Consultado el 4 de Enero de 2010].
- Liquiflo Chemical Processing Pumps [Internet]. Disponible en Web: [www.liquiflo.com](http://www.liquiflo.com) [Consultado el 14 de Enero de 2010].
- Omega Engineering Inc. [Internet]. Disponible en Web: [www.omega.com](http://www.omega.com) [Consultado el 4 de Enero de 2010].
- Online Materials Information Resource [Internet]. Disponible en Web: [www.mathweb.com](http://www.mathweb.com) [Consultado el 3 de Noviembre de 2009].
- Perstorp Winning Formulas [Internet]. Disponible en Web: [www.pertstorp.com](http://www.pertstorp.com) [Consultado el 18 de Noviembre de 2009].
- Renovart, el sitio del viento. [Internet]. Disponible en Web: [www.renovart.com/esdv/CONTENIDO\\_2\\_que\\_es\\_el\\_viento.htm](http://www.renovart.com/esdv/CONTENIDO_2_que_es_el_viento.htm) [Consultado el 14 de Febrero de 2010].
- R S Online [Internet]. Disponible en Web: [es.rs-online.com](http://es.rs-online.com) [Consultado el 4 de Enero de 2010].
- Textos Científicos [Internet]. Disponible en Web: [www.textoscientificos.com/quimica](http://www.textoscientificos.com/quimica) [Consultado el 27 de Octubre de 2009].

#### **Normas y Especificaciones:**

- Catálogo de normas UNE 1992.
- Código ASME B31.3, American Society of Mechanical Engineers, 2002.
- Código ASME Sección VIII-1 y Sección II, American Society of Mechanical Engineers, 2001.
- Especificaciones de Cepsa ESP-0200-1.
- Norma API 650.
- Normas TEMA, "Standards of the tubular exchanger manufacturers association", - Tubular exchanger manufacturers association Inc., 1999.

## **B. MEMORIA**

### **B.2. ANEXOS A LA MEMORIA**

## ÍNDICE

<b>1. Balance de materia y energía .....</b>	<b>7</b>
1.1. Ecuación de balance de materia.....	7
1.2. Diagrama de proceso .....	7
<b>2. Determinación de propiedades .....</b>	<b>9</b>
2.1. Capacidades caloríficas .....	9
2.1.1. Capacidades caloríficas de los gases .....	9
2.1.2. Capacidades caloríficas de los líquidos.....	9
2.2. Densidades.....	10
2.2.1. Densidades de los gases .....	10
2.2.2. Densidades de los líquidos.....	10
2.3. Viscosidades.....	11
2.3.1. Viscosidades de los gases .....	11
2.3.2. Viscosidades de los líquidos.....	12
2.4. Conductividades térmicas .....	13
2.5. Difusividades .....	15
2.6. Otras propiedades .....	16
2.6.1. Temperaturas de ebullición, pesos moleculares, y temperaturas y presiones críticas.....	16
2.6.2. Números de Prandtl.....	17
2.6.3. Calores latentes de vaporización.....	17
2.6.4. Constantes de la Ley de Antoine .....	17
<b>3. Diseño del intercambiador IC-01.....</b>	<b>18</b>
3.1. Características de las corrientes de entrada .....	18
3.2. Asignación de flujos .....	19
3.3. Cálculo de la temperatura de salida de la corriente fría .....	19
3.4. Características del intercambiador.....	22
3.5. Coeficiente global de transferencia de calor.....	22
3.6. Cálculo del área de intercambio de calor.....	25
3.7. Número y longitud de los tubos .....	25
3.8. Tamaño de carcasa y deflectores .....	26
3.9. Diseño mecánico .....	28

3.9.1. Espesor de tubos .....	28
3.9.2. Espesor de la carcasa .....	29
3.10. Pérdidas de carga.....	32
3.10.1. Pérdidas de carga en tubos .....	32
3.10.2. Pérdidas de carga en carcasa.....	33
3.11. Material de aislamiento .....	34
<b>4. Diseño del intercambiador IC-02.....</b>	<b>35</b>
4.1. Características de las corrientes de entrada .....	35
4.2. Asignación de flujos .....	36
4.3. Cálculo del caudal de vapor necesario .....	36
4.4. Características del intercambiador.....	37
4.5. Coeficiente global de transferencia de calor.....	38
4.6. Cálculo del área de intercambio de calor .....	40
4.7. Número y longitud de los tubos .....	40
4.8. Tamaño de carcasa y deflectores .....	41
4.9. Diseño mecánico .....	42
4.9.1. Espesor de tubos .....	42
4.9.2. Espesor de la carcasa .....	44
4.10. Pérdidas de carga.....	46
4.10.1. Pérdidas de carga en tubos .....	46
4.10.2. Pérdidas de carga en carcasa.....	47
4.11. Material de aislamiento .....	59
<b>5. Diseño del reactor R-01 .....</b>	<b>50</b>
5.1. Ecuaciones de balance .....	50
5.1.1. Balance de materia.....	50
5.1.2. Balance de energía .....	52
5.2. Cinética .....	52
5.2.1. Estequiometría de la reacción.....	52
5.2.2. Ecuación cinética .....	53
5.3. Características de la corriente de entrada .....	54
5.4. Características del reactor.....	55
5.5. Obtención de la masa de catalizador .....	55
5.6. Diseño mecánico de los tubos.....	57
5.7. Diseño mecánico de la carcasa .....	60
5.8. Refrigeración.....	64



5.9. Pérdidas de carga .....	67
5.9.1. Pérdidas de carga en tubos .....	67
5.9.2. Pérdidas de carga en carcasa.....	69
5.10. Material de aislamiento .....	72
<b>6. Diseño del intercambiador IC-03.....</b>	<b>73</b>
6.1. Características de las corrientes de entrada .....	73
6.2. Asignación de flujos .....	74
6.3. Cálculo del caudal de agua necesario.....	74
6.4. Características del intercambiador.....	76
6.5. Coeficiente global de transferencia de calor.....	76
6.6. Cálculo del área de intercambio de calor .....	78
6.7. Número y longitud de los tubos .....	79
6.8. Tamaño de carcasa y deflectores .....	80
6.9. Diseño mecánico .....	81
6.9.1. Espesor de tubos .....	81
6.9.2. Espesor de la carcasa .....	83
6.10. Pérdidas de carga.....	85
6.10.1. Pérdidas de carga en tubos .....	85
6.10.2. Pérdidas de carga en carcasa.....	86
6.11. Material de aislamiento .....	87
<b>7. Diseño del absorbedor A-01 .....</b>	<b>88</b>
7.1. Reacción química.....	88
7.2. Características de las corrientes de entrada .....	88
7.3. Cálculo de la temperatura de las corrientes de salida .....	89
7.4. Características de las corrientes de salida.....	91
7.5. Características del absorbedor.....	93
7.6. Módulo de Hatta .....	93
7.6.1. Módulo de Hatta en la parte superior de la columna .....	93
7.6.2. Módulo de Hatta en la parte inferior de la columna.....	96
7.7. Cálculo de la altura del absorbedor.....	98
7.8. Diseño mecánico.....	100
7.9. Pérdidas de carga.....	104
7.9.1. Pérdidas de carga del gas .....	104
7.9.2. Pérdidas de carga del líquido.....	105
7.10. Material de aislamiento .....	106

<b>8. Diseño del intercambiador IC-04.....</b>	<b>107</b>
8.1. Características de las corrientes de entrada .....	107
8.2. Asignación de flujos.....	108
8.3. Cálculo del caudal de agua necesario.....	108
8.4. Características del intercambiador.....	110
8.5. Coeficiente global de transferencia de calor.....	110
8.6. Cálculo del área de intercambio de calor.....	112
8.7. Número y longitud de los tubos .....	113
8.8. Tamaño de carcasa y deflectores .....	114
8.9. Diseño mecánico .....	115
8.9.1. Espesor de tubos .....	115
8.9.2. Espesor de la carcasa.....	117
8.10. Pérdidas de carga.....	119
8.10.1. Pérdidas de carga en tubos .....	119
8.10.2. Pérdidas de carga en carcasa.....	120
8.11. Material de aislamiento .....	121
<b>9. Diseño del mezclador M-01 .....</b>	<b>122</b>
9.1. Dimensiones del mezclador .....	122
9.2. Diseño mecánico .....	123
9.3. Diseño de la agitación.....	126
<b>10. Diseño de los depósitos de almacenamiento.....</b>	<b>128</b>
10.1. Diseño de los depósitos de formaldehído.....	128
10.1.1. Dimensiones de los depósitos .....	128
10.1.2. Diseño mecánico .....	129
10.2. Depósito Rundown .....	131
10.2.1. Dimensiones del depósito .....	132
10.2.2. Diseño mecánico .....	132
10.3. Cubeto de retención.....	135
<b>11. Diseño de la red de tuberías .....</b>	<b>137</b>
<b>12. Diseño de los elementos de impulsión .....</b>	<b>166</b>
12.1. Bombas.....	166
12.1.1. Bomba B-01 .....	169
12.1.2. Bomba B-02.....	171
12.1.3. Bomba B-03.....	172

12.1.4. Bomba B-04 .....	174
12.2. Soplates .....	176
12.2.1. Cálculo de la potencia necesaria .....	177
<b>13. Tablas .....</b>	<b>179</b>
<b>14. Catálogos .....</b>	<b>200</b>
<b>15. Fichas de seguridad .....</b>	<b>243</b>

## ANEXO 1: Balance de materia y energía

En este Anexo se expondrá la ecuación general empleada para la determinación del balance de materia y energía (siendo estas ecuaciones aplicadas de forma diferente dependiendo del proceso) y se expondrá en diagrama general del proceso con las corrientes de la planta, en las cuales se describirán los caudales y proporciones de los componentes.

### 1.1. Ecuación de balance de materia

La ecuación de balance de materia y energía (que se aplicará en cada proceso), es la siguiente:

$$(A) = (E) - (S) + (G) - (C) \quad [A.1.1]$$

Siendo (A) el término que engloba la acumulación, (E) son las entradas al proceso, (S) son las salidas, (G) engloba la generación dentro del proceso y (C) el consumo.

La generación y el consumo, (G) y (C), aparecen siempre que ocurra una reacción química, mientras que en los procesos puramente físicos estos términos no aparecen. Por ello, los términos de generación y consumo aparecerán en nuestro proceso en el reactor y en la torre de absorción (al producirse una reacción química además de una absorción). La acumulación no se va a considerar en ningún momento (excepto en el mezclador y en los depósitos) debido a que vamos a operar en estado estacionario y a que no existe ningún proceso que opere en discontinuo.

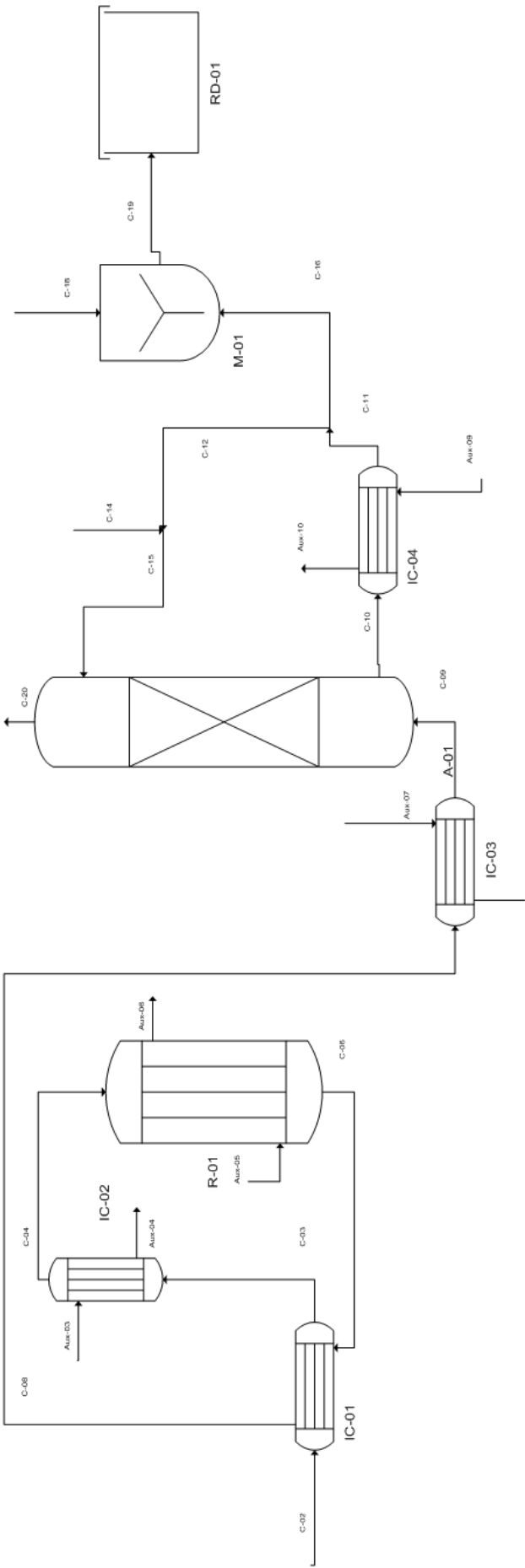
Gracias a esta ecuación, aplicada a cada proceso, se ha obtenido el diagrama de proceso y, aplicada a cada equipo, el diseño de cada operación unitaria.

### 1.2. Diagrama de proceso

Aquí se mostrará el diagrama simplificado del proceso (se expondrán todas las corrientes, pero no todos los equipos, solo se podrán observar los equipos principales (es decir, no aparecen las bombas, ventiladores, depósitos finales y elementos de control). En la tabla superior, además de aparecer las composiciones y caudales, aparecerán las temperaturas de las corrientes.

Se han sintetizado las corrientes que poseen un ventilador o una bomba entre ellas (por ejemplo, la corriente C-04 y C-05 son la misma pero con un ventilador entre ellas, por lo que las temperaturas y caudales son los mismos, habiéndose representado ambas en el diagrama por C-04). La corriente que aparece en el diagrama denominada C-02 es la síntesis de las corrientes C-01 y C-02 del proceso global (es decir, las corrientes de aire atmosférico y la de metanol como si estuvieran mezcladas, ya que en el intercambiador IC-01 se mezclan).

Balance de Materia											
Línea	Temperatura (K)	Caudal molar (mol/s)	Caudal másico (kg/s)	% molar O <sub>2</sub>	% molar N <sub>2</sub>	% molar MeOH	% molar H <sub>2</sub> O	% molar CH <sub>2</sub> O	% molar H <sub>2</sub>		
C-02	298	151,595	4,317	19,218	72,288	6,405	0	0	2,091		
C-03	544,07	151,595	4,317	19,218	72,288	6,405	0	0	2,091		
C-04	570	151,595	4,317	19,218	72,288	6,405	0	0	2,091		
C-06	570	156,35	4,316	15,588	70,088	0,124	6,086	6,086	1,401		
C-08	350	156,35	4,316	15,588	70,088	0,124	6,086	6,086	1,401		
C-09	310	156,35	4,316	15,588	70,088	0,124	6,086	6,086	1,401		
C-10	350,38	45,55	1,059	0	0	0,869	58,487	42,643	0		
C-11	310	45,55	1,059	0	0	0,869	58,487	42,643	0		
C-12	310	22,775	0,53	0	0	0,869	58,487	42,643	0		
C-14	310	3,153	0,056	0	0	0	100	0	0		
C-15	310	25,928	0,586	0	0	0,764	61,779	37,46	0		
C-16	310	22,775	0,53	0	0	0,869	58,487	42,643	0		
C-18	298	14,347	0,258	0	0	0	100	0	0		
C-19	298	37,123	0,788	0	0	0,533	73,302	26,164	0		
C-20	350,38	136,145	3,853	17,901	80,49	0	0	0	1,809		
Aux-03	610	113,858	2,049	0	0	0	100	0	0		
Aux-04	580	113,858	2,049	0	0	0	100	0	0		
Aux-05	298	232,222	4,19	0	0	0	100	0	0		
Aux-06	383	232,222	4,19	0	0	0	100	0	0		
Aux-07	298	134,053	2,413	0	0	0	100	0	0		
Aux-08	340	134,053	2,413	0	0	0	100	0	0		
Aux-09	298	54,275	0,977	0	0	0	100	0	0		
Aux-10	340	54,275	0,977	0	0	0	100	0	0		



## ANEXO 2: Determinación de propiedades

En este Anexo se expondrán las ecuaciones empleadas para la determinación de las propiedades de las sustancias que permitirán la obtención de las propiedades de las corrientes del proceso. Estas propiedades serán fundamentales para el diseño de todos los equipos que están implicados en la planta.

### 2.1. Capacidades caloríficas

Al existir tanto gases como líquidos en la planta, se dividirán las expresiones que permiten calcular capacidades caloríficas entre la de los gases y la de los líquidos.

#### 2.1.1. Capacidades caloríficas de los gases

Los gases que intervienen en el proceso son: nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, formaldehído, y agua y metanol, encontrándose ambos tanto en estado gas como líquido durante el proceso. Las expresiones que permiten calcular las capacidades caloríficas de cada compuesto, las cuales dependen de la temperatura, son (Perry et al., 2001):

$$c_{pN_2} = 6,5 + 0,00106 T \text{ cal/mol} \cdot K \quad [A. 2.1]$$

$$c_{pO_2} = 8,27 + 0,000258 \cdot T - 187700/T^2 \text{ cal/mol} \cdot K \quad [A. 2.2]$$

$$c_{pH_2} = 6,62 + 0,00081 \cdot T \text{ cal/mol} \cdot K \quad [A. 2.3]$$

$$c_{pCH_2O} = 33270 + 49540 \cdot \left( \frac{\left( \frac{186,6}{T} \right)}{\sinh\left( \frac{186,6}{T} \right)} \right)^2 + 28050 \cdot \left( \frac{\left( \frac{934,9}{T} \right)}{\cosh\left( \frac{934,9}{T} \right)} \right)^2 \text{ J/mol} \cdot K \quad [A. 2.4]$$

$$c_{pH_2O} = 8,22 + 0,00015 \cdot T + 0,00000134 \cdot T^2 \text{ cal/mol} \cdot K \quad [A. 2.5]$$

$$c_{pMeOH} = 39250 + 87900 \cdot \left( \frac{\left( \frac{1916,5}{T} \right)}{\sinh\left( \frac{1916,5}{T} \right)} \right)^2 + 53650 \cdot \left( \frac{\left( \frac{876,7}{T} \right)}{\cosh\left( \frac{876,7}{T} \right)} \right)^2 \text{ J/mol} \cdot K \quad [A. 2.6]$$

#### 2.1.2. Capacidades caloríficas de los líquidos

Los líquidos que intervienen en el proceso son: metilenglicol, y agua y metanol, encontrándose ambos tanto en estado gas como líquido durante el proceso. El metilenglicol, al no estar comprobado científicamente su existencia, sus propiedades no se han recogido en la bibliografía, por lo que se supondrá en este Proyecto Fin de Carrera que las propiedades de una molécula de metilenglicol serán las mismas que las de una molécula de formaldehído unida a una molécula de agua en estado líquido. Las expresiones que permiten calcular las

capacidades caloríficas de cada compuesto, las cuales dependen de la temperatura, son (Reid, Prausnitz & Sherwood, 1977):

$$c_{pH_2O} = 7,701 + 4,595 \cdot 10^{-4} \cdot T + 2,521 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0,859 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 \text{ cal/mol} \cdot K \quad [A.2.7]$$

$$c_{pMeOH} = 5,052 + 1,694 \cdot 10^{-2} \cdot T + 6,179 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 6,811 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 \text{ cal/mol} \cdot K \quad [A.2.8]$$

## 2.2. Densidades

Al existir tanto gases como líquidos en la planta, se dividirán las expresiones que permiten calcular las densidades entre la de los gases y la de los líquidos, además debido a que ambas densidades se obtienen mediante diferentes expresiones.

### 2.2.1. Densidades de los gases

Cuando los gases se comportan como gases ideales se puede usar la siguiente ecuación:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad [A.2.9]$$

Siendo P la presión a la que se encuentran los gases, V el volumen que ocupan esos gases, n el número de moles de gas, T la temperatura y R es la constante de los gases ideales. Si se divide todo entre el volumen se obtiene:

$$P = \rho_{molar} \cdot R \cdot T \quad [A.2.10]$$

Siendo  $\rho_{molar}$  la densidad molar del gas. Así, si se conoce la presión y la temperatura del sistema se puede calcular la densidad molar como:

$$\rho_{molar} = \frac{P}{R \cdot T} \quad [A.2.11]$$

Como se puede observar, se puede calcular la densidad molar sin tener en cuenta cada uno de los compuestos, sino que se usa la presión total del sistema para obtener la densidad molar total. La densidad másica se puede obtener mediante la expresión:

$$\rho = \rho_{molar} \cdot P_m \quad [A.2.12]$$

Siendo  $\rho$  la densidad másica y  $P_m$  el peso molecular de la sustancia. Como se ha calculado la densidad molar total, se necesitará para obtener la densidad másica total el peso molecular promedio. Este peso molecular promedio se calculará mediante una media ponderada de los pesos moleculares de la corriente en estudio.

### 2.2.2. Densidades de los líquidos

Los líquidos que operan en la planta son el agua, el metanol y el metilenglicol. Para el agua existen tablas donde se especifican muchas propiedades de esta sustancia a diferentes temperaturas. Por ello para las densidades del agua líquida se usará la **Tabla A.13.1**. Como el metilenglicol no se ha comprobado científicamente su existencia, se calculará su densidad como la de una mezcla equimolar de agua líquida y “formaldehído líquido”. Al no existir tablas como las del agua para el resto de sustancias, se usará para determinar la densidad del metanol y el formaldehído líquido la siguiente correlación empírica:

$$\rho = \frac{C_1}{C_2^{(1+(1-T/C_3)^{C_4})}} \quad [A.2.13]$$

Siendo T la temperatura de operación y  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$  constantes que dependen del compuesto. Tanto la correlación empírica como las constantes se encuentran tabuladas (Perry et al., 2001), pudiéndose observar en la siguiente tabla los valores que tiene cada constante para cada compuesto:

**Tabla A.2.1.**

Constantes para la correlación empírica de la densidad de los líquidos

Constante	Metanol	Formaldehído
$C_1$	2,288	1,9415
$C_2$	0,2685	0,22309
$C_3$	512,64	408
$C_4$	0,2453	0,28571

### 2.3. Viscosidades

Al existir tanto gases como líquidos en la planta, se dividirán las expresiones que permiten calcular las viscosidades entre la de los gases y la de los líquidos, además debido a que ambas viscosidades se obtienen mediante diferentes expresiones.

#### 2.3.1. Viscosidades de los gases

Para la obtención de las viscosidades de los gases se ha usado la siguiente correlación empírica que se ha encontrado (Perry et al., 2001):

$$\mu_c = 4,60 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{N \cdot M^{1/2} \cdot P_c^{2/3}}{T_c^{1/6}} \quad [A.2.14]$$

Siendo  $\mu_v$  la viscosidad del gas (estando medida en centipoise), M el peso molecular del compuesto,  $P_c$  la presión crítica de éste (en pascales) y  $T_c$  la temperatura crítica de la sustancia (en Kelvin). N es un parámetro que se calcula a partir de la temperatura reducida ( $T_r$ ) como sigue:



$$\begin{aligned} N &= 0,0003400 \cdot T_r^{0,94} && \text{para } T_r \leq 1,5 \\ N &= 0,0001778 \cdot (4,58 \cdot T_r - 1,67)^{0,625} && \text{para } T_r > 1,5 \end{aligned} \quad [A.2.15]$$

La temperatura reducida se calcula mediante su definición:

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad [A.2.16]$$

Siendo T la temperatura a la que se opera y T<sub>c</sub> la temperatura crítica. En el **Apartado 2.6.2.** del presente Anexo se pueden observar las presiones y temperaturas críticas para obtener la viscosidad, y los pesos moleculares se encuentran en el **Apartado 2.6.6.** del presente Anexo.

### 2.3.2. Viscosidades de los líquidos

Como se dijo anteriormente, los líquidos que operan en la planta son el agua, el metanol y el metilenglicol. Como se comentó en el **Apartado 2.2.2.** del presente Anexo, para el agua existen tablas de propiedades a diferentes temperaturas, por lo que se escogerán las viscosidades del agua líquida a partir de la **Tabla A.13.1.** Para el metanol existen también tablas para determinar su viscosidad (véase **Tabla A.13.2.**). Al no existir tablas como las del agua y las de metanol para el metilenglicol líquido, se usará la siguiente correlación empírica (Perry et al., 2001):

$$\log \mu = B \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) - 3 \quad [A.2.17]$$

Siendo μ la viscosidad del líquido, T la temperatura a la que se opera, y siendo T<sub>0</sub> y B unos parámetros que se calculan mediante las expresiones:

$$B = B_a + \sum \Delta B_i \quad [A.2.18]$$

$$N^0 \leq 20 \quad T_0 = 28,86 + 37,439 \cdot N^0 - 1,3547 \cdot (N^0)^2 - 0,02076 \cdot (N^0)^3 \quad [A.2.19]$$

Siendo B<sub>a</sub>, y N<sup>0</sup> parámetros que se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$N^0 = N + \sum \Delta N_i \quad [A.2.20]$$

$$N^0 \leq 20 \quad B_a = 24,79 + 66,885 \cdot N^0 - 1,3173 \cdot (N^0)^2 - 0,00377 \cdot (N^0)^3 \quad [A.2.21]$$

Se han expuesto las ecuaciones par N<sup>0</sup> menor o igual a 20 porque para el metilenglicol N<sup>0</sup> es menor a 20 (existen ecuaciones para N<sup>0</sup> mayor a 20, pero no se expondrán aquí).

N se define como el número de carbonos que posee la fórmula de la sustancia orgánica, y ΔN<sub>i</sub> se obtiene mediante contribución de grupos. Así, se ha encontrado la siguiente tabla (se ha recogido un extracto de ésta) que nos da los valores para calcular la contribución de grupos, y también los valores de ΔB<sub>i</sub> (Perry et al., 2001):

**Tabla A.2.2.**  
Correlaciones para la contribución de grupos

Structures or functional group	$\Delta N_i$	$\Delta B_i$
n-Alkanes	0	0
Isalkanes	$1.389 - 0.238N$	15.51
Saturated hydrocarbons with two methyl groups in isoposition	$2.319 - 0.238N$	15.51
n-Alkanes	$-0.152 - 0.042N$	$-44.94 + 5.410N^*$
n-Alkadienes	$-0.304 - 0.084N$	$-44.94 + 5.410N^*$
Polyphenols	$-5.340 + 0.815N$	$-188.40 + 9.558N^*$
Alcohols		
Primary	$10.606 - 0.276N$	$-589.44 + 70.519N^*$
Secondary	$11.200 - 0.605N$	497.58
Tertiary	$11.200 - 0.605N$	928.83
Diols (correction)	See remarks	557.77
Phenols (correction)	$16.17 - N$	213.68
—OH on side chain to aromatic ring (correction)	-0.16	213.68
Acids	$6.795 + 0.365N$	$-249.12 + 22.449N^*$

En los dioles se le debe restar 2,5 a N.

Mediante esta tabla, se puede extraer las siguientes conclusiones:

$$\Delta N_i = 10,606 - 0,276 \cdot N + N - 2,5 \quad [A.2.22]$$

$$\Delta B_i = 557,77$$

Conociendo ambas expresiones y que el número de carbonos del metilenglicol es 1, se puede obtener la siguiente tabla con todos los parámetros:

**Tabla A.2.3.**  
Parámetros para la determinación de la viscosidad de metilenglicol líquido

Parámetro	N	$\Delta N_i$	$N^0$	$T_o$ (K)	$\Delta B_i$	$B_a$	B
Valor	1	8,83	9,83	285,7	557,77	551,40	1109,17

## 2.4. Conductividades térmicas

De todos los compuestos con los que se opera en la planta, hay algunos de ellos en los que se poseen valores de conductividades térmicas a diferentes temperaturas. Así el agua tanto líquida y vapor, en las anteriormente citadas tablas se encuentra tabulada las conductividades térmicas a diferentes temperaturas. Además existen tablas que proporcionan las conductividades térmicas del hidrógeno, oxígeno y nitrógeno a diferentes temperaturas, como la que se muestra a continuación:

**Tabla A.2.4.**

Conductividades térmicas de diferentes gases a presión atmosférica (Perry et al., 2001)

Substance	Thermal conductivity, W/(m·K) Temperature, K				
	250	300	400	500	600
Acetone	0.0080	0.0115	0.0201	0.0310	
Acetylene	0.0162	0.0213	0.0332	0.0452	0.0561
Ammonia	0.0197	0.0246	0.0364	0.0506	0.0656
Argon	0.0152	0.0177	0.0223	0.0264	0.0301
Benzene	0.0077	0.0104	0.0195	0.0335	0.0524
Bromine	0.0038	0.0048	0.0067		
Butane	0.0117	0.0160	0.0264	0.0377	
CO <sub>2</sub>	0.0129	0.0166	0.0244	0.0323	0.0403
CCl <sub>4</sub>	0.0053	0.0067	0.0099	0.0126	
Chlorine	0.0071	0.0089	0.0124	0.0156	0.0190
Deuterium	0.122	0.141	0.176		
Ethane	0.0156	0.0218	0.0360	0.0516	0.0685
Ethylene	0.0152	0.0214	0.0342	0.0491	0.0653
Helium	0.134	0.150	0.180	0.211	0.247
Heptane	0.0082	0.0120	0.0214	0.0325	0.0447
Hydrogen	0.156	0.182	0.221	0.256	0.291
Methane	0.0277	0.0343	0.0484	0.0671	0.0948
Nitrogen	0.0222	0.0260	0.0325	0.0386	0.0441
Oxygen	0.0225	0.0267	0.0343	0.0412	0.0480
Pentane	0.0107	0.0152	0.0250	0.0362	
Propane	0.0129	0.0183	0.0295	0.0417	
Propylene	0.0114	0.0168	0.0226	0.0430	0.0580
R 11		0.0078	0.0119		
R 12	0.0072	0.0097	0.0151	0.0208	
R 13	0.0091	0.0121	0.0185	0.0248	
R 21		0.0088	0.0135	0.0181	
R 22	0.0080	0.0109	0.0170	0.0230	0.0290
SO <sub>2</sub>	0.0078	0.0096	0.0143	0.0200	0.0256

Para el cálculo de la conductividad de alguno de estos compuestos mediante la tabla se realiza una interpolación de los datos a la temperatura media del proceso.

Para el resto de gases (no se necesitan las conductividades térmicas durante el diseño ni del metilenglicol ni del metanol líquido) se usa la siguiente correlación empírica (Perry et al., 2001):

$$k_G = \frac{\eta_G}{M} \cdot (1,15 \cdot C_v + 16903,36) \quad [A.2.23]$$

Siendo  $k_G$  la conductividad térmica del gas (medida en W/m·K),  $\eta_G$  la viscosidad del gas (en Pa·s, se calcula mediante las ecuaciones del **Apartado 2.3.1.** del presente Anexo),  $M$  el peso molecular del compuesto y  $c_v$  la capacidad calorífica de la sustancia a volumen constante (medida en J/kmol·K). La ecuación que permite el cálculo de  $c_v$  es:

$$c_v = c_p - R \quad [A.2.24]$$

Siendo  $c_p$  la capacidad calorífica del compuesto (en J/kmol·K, calculada mediante las ecuaciones del **Apartado 2.1.1.** del presente Anexo) y  $R$  es la constante de los gases ideales (medida en J/kmol·K).

## 2.5. Difusividades

Existen dos difusividades que, durante el diseño del proceso, se deben calcular: la difusividad del formaldehído gas en agua líquida, y la del formaldehído gas en el gas (formando en su mayoría por nitrógeno y oxígeno, por lo que se puede suponer que es aire, aunque existe también hidrógeno). Ambas difusividades se emplean en el diseño del **Absorbedor A-01**.

Veamos cada una de ella:

- **Difusividad del formaldehído gas en agua líquida:**

Al ser una difusividad de un gas en un líquido, y ser este líquido agua, se usará la siguiente correlación empírica hallada (Perry et al, 2001):

$$\mathcal{D}_A = \frac{8,621 \cdot 10^{14}}{\mu_{H_2O}^{1,14} \cdot V_{CH_2O}^{0,589}} \quad [A. 2.25]$$

Siendo  $\mathcal{D}_A$  la difusividad del formaldehído en el agua (medida en  $m^2/s$ ),  $\mu_{H_2O}$  la viscosidad del agua líquida (en  $Pa \cdot s$ ) y  $V_{CH_2O}$  el volumen de formaldehído (en  $m^3/kmol$ ). La viscosidad se recoge de la **Tabla A.13.1.** y el volumen de formaldehído se puede calcular mediante la densidad molar (véase la **Ecuación A.2.10** del presente Anexo) conociendo las condiciones de operación y calculando la presión parcial de formaldehído (téngase en cuenta que el volumen se calcula como la inversa de la densidad molar):

$$P_{CH_2O} = x \cdot P_{total} \quad [A.2.26]$$

Siendo  $P_{CH_2O}$  la presión parcial de formaldehído,  $x$  la composición de formaldehído en la corriente en tanto por uno, y  $P_{total}$  la presión total de la corriente.

- **Difusividad del formaldehído gas en aire:**

Al ser una difusividad de un gas en otro gas se usará la correlación empírica siguiente (Perry et al., 2001):

$$D_{12} = \frac{0,1013 \cdot T^{1,75} \cdot \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}\right)^{0,5}}{P \cdot [(\sum v_1)^{1/3} + (\sum v_2)^{1/3}]^2} \quad [A. 2.27]$$

Siendo  $\mathcal{D}_{12}$  la difusividad del formaldehído en el aire (medida en  $m^2/s$ ),  $M$  los pesos moleculares,  $T$  la temperatura (en K),  $P$  la presión total del sistema (en Pa) y  $\sum v$  es un parámetro que se calcula mediante contribución de grupos. El fluido 1 es el fluido que se difunde (en este caso, formaldehído) y el fluido 2 es el fluido por el que se difunde (en este caso, aire).

Mediante la tabla siguiente (Perry et al., 2001) se puede calcular el parámetro  $\Sigma v_1$  (el del formaldehído) y  $\Sigma v_2$  (el del aire, que como se puede ver en la tabla vale 20,1):

**Tabla A.2.5.**

Contribución de grupos para la determinación del parámetro  $\Sigma v$  (Perry et al., 2001)

Atomic and structural diffusion-volume increments $v$			
C	16.5	Cl	(19.5)
H	1.98	S	(17.0)
O	5.481	Aromatic ring	-20.2
N	(5.69)	Heterocyclic ring	-20.2
Diffusion volumes for simple molecules			
H <sub>2</sub>	7.07	CO	18.9
D <sub>2</sub>	6.70	CO <sub>2</sub>	26.9
He	2.88	N <sub>2</sub> O	35.9
N <sub>2</sub>	17.9	NH <sub>3</sub>	14.9
O <sub>2</sub>	16.6	H <sub>2</sub> O	12.7
Air	20.1	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	(114.8)
Ar	16.1	SF <sub>6</sub>	(69.7)
Kr	22.8	Cl <sub>2</sub>	(37.7)
Xe	(37.9)	Br <sub>2</sub>	(67.2)
		SO <sub>2</sub>	(41.1)

Así se puede concluir que:

$$\Sigma v_1 = 1 \cdot 16,5 + 2 \cdot 1,98 + 1 \cdot 5,481 = 25,94$$

Conociendo los pesos moleculares del aire, el del formaldehído y las condiciones de operación se puede calcular la difusividad del formaldehído en aire.

## 2.6. Otras propiedades

En este apartado se expondrán el resto de propiedades de las corrientes en las cuales no se han usado correlaciones ni ecuaciones para su cálculo, sino que se han obtenido de tablas.

### 2.6.1. Temperaturas de ebullición, pesos moleculares, y temperaturas y presiones críticas

Las temperaturas de ebullición de las sustancias empleadas son:

**Tabla A.2.6.**

Propiedades de los compuestos

	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> O	MeOH	H <sub>2</sub> O
T <sub>eb</sub> (K)	90,2	77,4	20,4	254	338	373
T <sub>c</sub> (K)	154,58	126,2	33,2	408	512,64	647,13
P <sub>c</sub> (Pa)	5,02·10 <sup>6</sup>	3,39·10 <sup>6</sup>	1,30·10 <sup>6</sup>	6,59·10 <sup>6</sup>	8,14·10 <sup>6</sup>	2,19·10 <sup>7</sup>
P <sub>m</sub> (g/mol)	32	28	2	30	32	18

### 2.6.2. Números de Prandtl

La ecuación que permite el cálculo del número de Prandtl es la siguiente:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad [A. 2.28]$$

### 2.6.3. Calores latentes de vaporización

Las sustancias que sufren un cambio de fase durante el proceso son el agua y el metanol, siendo sus calores latentes de vaporización:

**Tabla A.2.7.**  
Calores latentes de vaporización

	$\lambda$ (J/mol)
Agua	44082
Metanol	35200

### 2.6.4. Constantes de la Ley de Antoine

La ecuación que permite el cálculo la presión de vapor de una sustancia es la Ecuación de Antoine. Las constantes del agua y del metanol para esta ecuación son:

**Tabla A.2.8.**  
Constantes de la ecuación de Antoine para el agua y el metanol

Constante	Agua	Metanol
A	18,3036	18,5875
B	3816,44	3626,55
C	-43,13	-34,29

## ANEXO 3: Diseño del intercambiador IC-01

El intercambiador IC-01 es el que se encarga de mezclar y precalentar la corriente de entrada al reactor R-01 (la mezcla de aire y metanol) mediante el intercambio de calor con la corriente de salida del reactor R-01. Como se comentó en la memoria, este intercambiador será de carcasa y tubos. A continuación estarán definidos los cálculos realizados para su diseño.

### 3.1. Características de las corrientes de entrada

El fluido frío posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{ent}$ ): 298 K
- ✓ Temperatura de salida ( $T_{sal}$ ): 544,07 K
- ✓ Temperatura media ( $T_{med}$ ): 421,035 K
- ✓ Viscosidad media ( $\mu$ ):  $2,207 \cdot 10^{-5}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ): 0,97 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Conductividad térmica ( $k$ ): 0,037 W/m·K
- ✓ Número de Prandtl (Pr): 0,699
- ✓ Presión de entrada (P): 1,15 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{molar}$ ): 151,595 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 4,317 kg/s

Las propiedades tomadas anteriormente (excepto las temperaturas, presión y caudales) se han tomado como la media ponderada de las propiedades de cada compuesto. Las propiedades de cada compuesto se han realizado como la media aritmética de las propiedades de tal compuesto a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida. Al ser la mayor parte de la corriente fría un gas a la temperatura de entrada (el metanol es un líquido de 298 K hasta 338 K, siendo la proporción de éste menor a un 7% en moles), y a la temperatura de salida ser totalmente un gas, se ha decidido calcular las propiedades del metanol como las del vapor de metanol.

El fluido caliente posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{ent}$ ): 570 K
- ✓ Temperatura de salida ( $T_{sal}$ ): 350 K
- ✓ Temperatura media ( $T_{med}$ ): 460 K

- ✓ Viscosidad media( $\mu$ ):  $2,267 \cdot 10^{-5}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ):  $0,93 \text{ kg/m}^3$
- ✓ Conductividad térmica ( $k$ ):  $0,039 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- ✓ Número de Prandtl (Pr):  $0,681$
- ✓ Presión entrada (P):  $1,20 \text{ atm}$
- ✓ Caudal molar ( $W_{\text{molar}}$ ):  $156,350 \text{ mol/s}$
- ✓ Caudal másico (W):  $4,316 \text{ kg/s}$

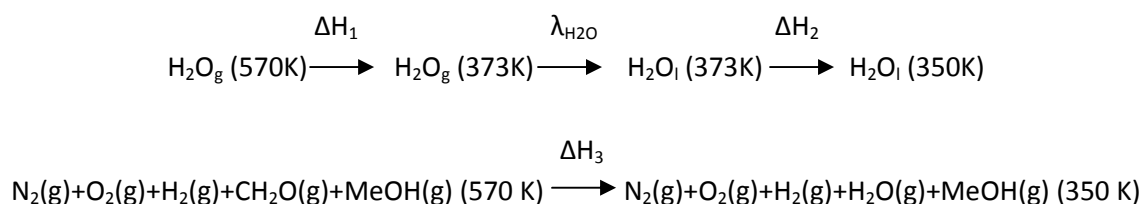
Al igual que con el fluido frío, las propiedades tomadas anteriormente (excepto las temperaturas, presión y caudales) se han tomado como la media ponderada de las propiedades de cada compuesto. Las propiedades de cada compuesto se han realizado como la media aritmética de las propiedades de tal compuesto a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida. Al ser la mayor parte de la corriente caliente un gas a la temperatura de salida (el agua es un líquido de  $373 \text{ K}$  a  $350 \text{ K}$ , siendo la proporción de agua menor a un 7% en moles), y a la temperatura de entrada ser totalmente un gas, se ha decidido calcular las propiedades del agua como la de sus vapores.

### 3.2. Asignación de flujos

Los criterios en los que se basa la asignación de flujos en el intercambiador se encuentran en el **Apartado 7.1.3.** de la **Memoria Descriptiva** del presente Proyecto Fin de Carrera. Según estos criterios la corriente caliente, al contener formaldehído, deberá ir por los tubos al necesitar este compuesto aceros especiales para su transporte y almacenamiento (por lo tanto, materiales más caros).

### 3.3. Cálculo de la temperatura de salida de la corriente fría

Para el diseño del presente intercambiador de calor se supuso una temperatura de salida del fluido caliente para poder obtener la temperatura de salida del fluido frío. Realizando un balance de energía a la corriente caliente se obtiene:



Calculándose  $\Delta H_1$ ,  $\Delta H_2$  y  $\Delta H_3$  como:



$$\Delta H = W \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [\text{A.3.1}]$$

Siendo  $W$  el caudal del compuesto,  $c_p$  la capacidad calorífica del compuesto y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas que sufre el compuesto.  $\Delta H_3$  se calculará como la suma de todas las entalpías que proporciona cada componente.

Así se calcula el calor desprendido como:

$$Q = \Delta H_1 + \lambda_{H_2O} + \Delta H_2 + \Delta H_3 \quad [\text{A.3.2}]$$

Aplicando las ecuaciones del **Apartado 2.1.** del **Anexo 2** se obtienen los valores de  $c_p$  medio (se obtienen estos valores como la media aritmética entre el valor a la temperatura inicial y el valor a la temperatura final):

**Tabla A.3.1.**  
Capacidades caloríficas medias de la corriente caliente

Capacidades caloríficas medias (cal/mol·K)	
$c_p(\text{O}_2)$	7,334
$c_p(\text{H}_2)$	6,993
$c_p(\text{N}_2)$	6,988
$c_p(\text{CH}_2\text{O})$	10,055
$c_p(\text{MeOH})_g$	13,605
$c_p(\text{H}_2\text{O})_g$	8,589
$c_p(\text{H}_2\text{O})_l$	8,298

Pasando las  $c_p$  medias a Julios, y como se conocen las composiciones molares y el caudal molar de la corriente caliente y sabiendo que  $\lambda_{H_2O} = 44082 \text{ J/mol}$  se obtienen las entalpías que intervienen en el proceso:

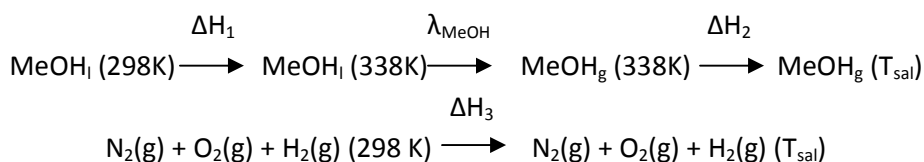
**Tabla A.3.2.**  
Entalpías del ciclo termodinámico del fluido caliente

$\Delta H_1$	$-6,730 \cdot 10^4 \text{ J/s}$
$\Delta H_2$	$-7,591 \cdot 10^3 \text{ J/s}$
$\Delta H_3$	$-9,730 \cdot 10^5 \text{ J/s}$
$\lambda_{H_2O}$	$-4,195 \cdot 10^5 \text{ J/s}$

Mediante la **Ecuación A.3.2** se obtiene:

$$Q = -1,467 \cdot 10^6 \text{ J/s}$$

Se realiza un balance de energía al fluido frío:



Calculándose  $\Delta H_1$ ,  $\Delta H_2$  y  $\Delta H_3$  como:

$$\Delta H = W \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [\text{A.3.3}]$$

Siendo  $W$  el caudal del compuesto,  $c_p$  la capacidad calorífica del compuesto y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas que sufre el compuesto.  $\Delta H_3$  se calculará como la suma de todas las entalpías que proporciona cada componente.

Así el calor desprendido del fluido caliente será:

$$Q = -(\Delta H_1 + \lambda_{\text{MeOH}} + \Delta H_2 + \Delta H_3) \quad [\text{A.3.4}]$$

Aplicando las ecuaciones del **Apartado 2.1.** del **Anexo 2** se obtienen los valores de  $c_p$  medio (se obtienen estos valores como la media aritmética entre el valor a la temperatura inicial y el valor a la temperatura final (se supondrá una temperatura de salida inicial, y después se irá corrigiendo conforme el valor obtenido de  $T_{\text{sal}}$  hasta que este valor de temperatura se estabilice; estas  $c_p$  son las definitivas, es decir, las que se obtienen con el valor exacto de  $T_{\text{sal}}$ ):

**Tabla A.3.3.**

Capacidades caloríficas medias de la corriente fría

Capacidades caloríficas medias (cal/mol·K)	
$c_p(\text{O}_2)$	7,005
$c_p(\text{H}_2)$	6,961
$c_p(\text{N}_2)$	6,946
$c_p(\text{MeOH})_g$	10,980
$c_p(\text{MeOH})_l$	10,406

Pasando las  $c_p$  medias a Julios, y como se conocen las composiciones molares y el caudal molar de la corriente caliente, y sabiendo que  $\lambda_{\text{MeOH}} = 35200 \text{ J/mol}$  se pueden obtener  $\Delta H_1$  y  $\lambda_{\text{MeOH}}$ :

**Tabla A.3.4.**

Entalpías del ciclo termodinámico del fluido frío

$\lambda_{\text{MeOH}}$	$3,42 \cdot 10^5 \text{ J/s}$
$\Delta H_1$	$1,69 \cdot 10^4 \text{ J/s}$

Despejando términos se puede obtener la siguiente ecuación:

$$\Delta H_2 + \Delta H_3 = Q - \Delta H_1 - \lambda_{\text{MeOH}} \quad [\text{A.3.5}]$$

Siendo:

$$\Delta H_2 = W_{MeOH} \cdot c_{pMeOHg} \cdot (338 - T_{sal}) \quad [A.3.6]$$

$$\Delta H_3 = (W_{H_2} \cdot c_{pH_2} + W_{N_2} \cdot c_{pN_2} + W_{O_2} \cdot c_{pO_2}) \cdot (298 - T_{sal}) \quad [A.3.7]$$

Como se tienen todos los datos excepto  $T_{sal}$ , que es nuestra incógnita, se puede resolver la ecuación obteniendo:

$$T_{sal} = 544,07 \text{ K}$$

### 3.4. Características del intercambiador

Se van a tomar las siguientes consideraciones para el diseño del intercambiador:

- Se escogerá un intercambiador de carcasa y tubos con un paso por carcasa y un paso por tubos.
- Los tubos estarán contruidos con Acero Carpenter 20 Mo-6 (es similar a la aleación Incoloy) debido a ser resistente a las atmósferas de formaldehído.
- La carcasa, al no estar en contacto con formaldehído, se construirá de Acero SA-240 (AISI 316L).
- El diámetro exterior de los tubos será de 5/4 de pulgada (1,25 in) y el diámetro interno será de 1,06 pulgadas (posteriormente se comprobará este diámetro).
- Los tubos estarán en configuración cuadrada con un pitch (o separación entre tubos) de 1y 9/16 pulgada (1,5625 in).

### 3.5. Coeficiente global de transferencia de calor

Los intercambiadores de calor se basan en la transferencia de calor de un fluido caliente a uno frío separados por una pared sólida. Así, el calor se transfiere por convección desde el fluido caliente hacia la pared, después se transmite a través de la pared por conducción y finalmente se transmite por convección desde la pared al fluido frío. Generalmente la transmisión por radiación se suele incluir en los términos de convección. Así, existen tres resistencias en serie a la transferencia de calor: dos a la convección y una a la conducción. La expresión que se obtiene de la resistencia global es:

$$R = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{1}{h_o \cdot A_o} \quad [A.3.8]$$

Siendo los subíndices i y o las superficies interior y exterior de los tubos, L la longitud de los tubos, h los coeficientes individuales de convección, k la conductividad del material y A las áreas de intercambio de calor.

Se puede definir el calor mediante la siguiente ecuación:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad [A.3.9]$$

Siendo U el coeficiente global de transferencia de calor, que se define como la inversa de la suma de todas las resistencias a la transferencia de calor que se dan en el proceso. Así:

$$\frac{1}{U \cdot A_s} = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{1}{h_o \cdot A_o} \quad [A.3.10]$$

Pero el coeficiente global de transferencia de calor debe referirse a un área de intercambio; para ello vamos a basarnos en el área exterior de los tubos:

$$\frac{1}{U} = \frac{D_o}{h_i \cdot D_i} + \frac{D_o \cdot \ln(r_o/r_i)}{2 \cdot k} + \frac{1}{h_o} \quad [A.3.11]$$

A continuación se calcularán los términos de la anterior ecuación.

### Coeficiente individual de convección interna ( $h_i$ )

El coeficiente individual de convección interna se obtiene mediante la definición del número de Nusselt:

$$Nu_d = \frac{h_i \cdot D_i}{k} \quad [A.3.12]$$

Siendo  $h_i$  el coeficiente individual de convección interna,  $k$  la conductividad de la sustancia y  $D_i$  el diámetro interior del tubo.

Existen múltiples correlaciones empíricas que permiten calcular el número de Nusselt conociendo el número de Reynolds, el número de Prandtl y la configuración del flujo (sobre láminas, dentro de tubos, convección natural, etc.).

Primero se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{4 \cdot W_m}{\mu \cdot \pi \cdot D_i} \quad [A.3.13]$$

Siendo  $W_m$  el caudal másico del fluido que circula por el interior de los tubos,  $\mu$  la viscosidad de este fluido y  $D_i$  el diámetro interior del tubo. Como se tienen todas las propiedades (se encuentran al inicio del presente apartado de este Anexo) se calcula el valor de este número:

$$Re = \frac{4 \cdot 4,316 \text{ kg/s}}{2,267 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \pi \cdot 0,0269 \text{ m}} = 9,011 \cdot 10^6$$

Como el valor del número de Reynolds es mayor a 10.000 el fluido en el interior de los tubos está en flujo turbulento. Se emplea la siguiente expresión para calcular el número de Nusselt (Mendia Urquiola, 1994):

$$Nu_d = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,3} \quad [A.3.14]$$

El exponente al que se encuentra elevado el número de Prandtl es 0,3 porque es el exponente que se usa para cuando la pared de los tubos se encuentra a menor temperatura que el fluido que circula por el interior de los tubos.

Mediante la **Ecuación A.3.14** se obtiene:

$$Nu_d = 0,023 \cdot (9,011 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot 0,681^{0,3} = 7507,62$$

Se usa ahora la **Ecuación A.3.12** y se obtiene el valor del coeficiente individual de convección interna:

$$h_i = \frac{Nu_d \cdot k}{D_i} = \frac{7507,62 \cdot 0,039 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{0,0269 \text{ m}} = 1,088 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### Coeficiente individual de convección externa ( $h_0$ )

El coeficiente individual de convección externa se obtiene de la misma manera que el coeficiente individual de convección interna pero mediante las siguientes ecuaciones:

$$Nu_d = \frac{h_0 \cdot D_0}{k} \quad [A.3.15]$$

$$Re = \frac{4 \cdot W_m}{\mu \cdot \pi \cdot D_0} \quad [A.3.16]$$

Como se tienen todas las propiedades (se encuentran al inicio del presente apartado de este Anexo) se calcula el valor de este número:

$$Re = \frac{4 \cdot 4,316 \text{ kg/s}}{2,207 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \pi \cdot 0,03175 \text{ m}} = 7,884 \cdot 10^6$$

Como el valor del número de Reynolds es mayor a 10.000 el fluido en el exterior de los tubos está en flujo turbulento. Se emplea la siguiente expresión para calcular el número de Nusselt (Mendia Urquiola, 1994):

$$Nu_d = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,3} \quad [A.3.17]$$

Mediante la **Ecuación A.3.17** se obtiene:

$$Nu_d = 0,023 \cdot (7,844 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot 0,681^{0,3} = 6771,86$$

Se usa ahora la **Ecuación A.3.15** y se obtiene el valor del coeficiente individual de convección externa:

$$h_0 = \frac{Nu_d \cdot k}{D_0} = \frac{6771,86 \cdot 0,039 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{0,03175 \text{ m}} = 8318,19 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### Conductividad del material (k)

La conductividad del material (Acero Carpenter 20 Mo-6) se obtiene de la **Tabla A.13.10.**, e interpolando entre las temperaturas de entrada y salida de los fluidos se tiene:

$$k = 12,1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

Ya obtenidos estos parámetros se puede calcular el coeficiente global de transferencia de calor mediante la **Ecuación A.3.11**. Sustituyendo los valores se obtiene:

$$U = 2241,46 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### 3.6. Cálculo del área de intercambio de calor

Mediante la **Ecuación A.3.9** se puede obtener el área de intercambio de calor si conocemos tanto U (coeficiente global de transferencia de calor, calculado en el **Apartado 3.5.** del presente anexo), Q (calor intercambiado, calculado en el **Apartado 3.3.** del presente anexo) y  $\Delta T_{ml}$  (diferencia de temperatura media logarítmica).

Por ello se procede al cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica, que se define como:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{cale} - T_{frío_s}) - (T_{cal_s} - T_{frío_e})}{\ln\left(\frac{T_{cale} - T_{frío_s}}{T_{cal_s} - T_{frío_e}}\right)} \quad [\text{A.3.18}]$$

Mediante la sustitución de las temperaturas se obtiene:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(570\text{K} - 544,15\text{K}) - (350\text{K} - 298\text{K})}{\ln\left(\frac{570\text{K} - 544,15\text{K}}{350\text{K} - 298\text{K}}\right)} = 37,41 \text{ K}$$

Ya se puede calcular el área de intercambio de calor mediante la **Ecuación A.3.9**:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{1,474 \cdot 10^6 \text{ J/s}}{2241,46 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 37,41\text{K}} = 17,493 \text{ m}^2$$

### 3.7. Número y longitud de los tubos

La ecuación que permite el cálculo del número de los tubos es la siguiente:

$$N_{tubos} = \frac{m_f}{v \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \rho} \quad [\text{A.3.19}]$$

Siendo  $v$  la velocidad de paso del fluido por el interior de los tubos,  $\rho$  la densidad de ese fluido y  $m_f$  el caudal másico del fluido (lo que hemos denominado anteriormente como  $W$ ).

Se usa una velocidad que se encuentre en el rango de velocidades comunes para la condiciones del fluido con el que estamos operando. En nuestro caso, el fluido es un gas sobrecalentado a presión entre 0 y 10 psig (1 atm a 1,68 atm) que circula por tubos con diámetros menores a 6 pulgadas, por lo que el rango de velocidades se encuentra entre 50 ft/s y 140 ft/s (15,24 m/s y 42,672 m/s). Se usará el valor promedio aproximado entre ambos valores (25 m/s o 82 ft/s).

Así se obtiene:

$$N_{tubos} = \frac{4,316 \text{ kg/s}}{25 \text{ m/s} \cdot \frac{\pi \cdot (0,0269)^2 \text{ m}^2}{4} \cdot 0,92 \text{ kg/m}^3} = 329,60$$

Por lo tanto se necesitan como mínimo 37 tubos, mediante la **Tabla A.13.5.** se obtiene para configuración cuadrada con un paso por tubos y un diámetro exterior de tubo de 1,25 pulgadas un número de tubos igual a 352. Con estas características se obtiene un diámetro de carcasa de 39 pulgadas (0,9906 m) y un pitch de 1 y 9/16 de pulgada (0,0397 m).

Se calcula a continuación la longitud de los tubos mediante la ecuación de definición del área de un cilindro aplicada al conjunto de los tubos:

$$A_0 = \pi \cdot D_0 \cdot N \cdot L \quad [A.3.20]$$

Se sustituyen los términos y se obtiene:

$$L = \frac{A_0}{\pi \cdot D_0 \cdot N} = \frac{17,493 \text{ m}^2}{\pi \cdot 0,03175 \text{ m} \cdot 352} = 0,498 \text{ m} = 1,635 \text{ ft}$$

Por tanto, se tomará una longitud normalizada de 2 pies (0,610 m) para la longitud de los tubos.

### 3.8. Tamaño de carcasa y deflectores

El diámetro de la carcasa será, como se comentó anteriormente, de 39 pulgadas (0,9906 m). Este valor se ha obtenido de la **Tabla A.13.5.** tomando número de tubos igual a 352, un paso por tubos, configuración cuadrada con un pitch de 1 y 9/16 de pulgada y tubos de un diámetro exterior de 1,25 pulgadas.

Los deflectores son placas que se colocan en el lado de la carcasa que permiten que el fluido circule lo más perpendicular posible al haz de tubos y esto mejora sustancialmente la transferencia de calor.

El número de deflectores se calcula mediante la ecuación:

$$N_c = \frac{L}{P_{def}} \quad [A.3.21]$$

Donde L es la longitud de los tubos y  $P_{def}$  es la distancia entre deflectores

En las normas T.E.M.A. existen un criterio para la determinación de la distancia mínima y máxima entre deflectores. Así la distancia mínima entre deflectores se define como la mayor de las distancias siguientes:

- 2 pulgadas (0,0508 m)
- 1/5 del diámetro de la carcasa (0,0508 m)

En este caso ambos valores son los mismos, por lo que la distancia mínima entre deflectores será de 0,508 m.

La distancia máxima entre deflectores se determina mediante la siguiente tabla:

**Tabla A.3.5.**

Normas T.E.M.A.: Separación máxima entre deflectores

Tube OD	Tube Materials and Temperature Limits °F (°C)	
	Carbon Steel & High Alloy Steel, 759 (399) Low Alloy Steel, 850 (454) Nickel-Copper, 600 (316) Nickel, 850 (464) Nickel-Chromium-Iron, 1000 (538)	Aluminum & Aluminum Alloys, Copper & Copper Alloys, Titanium Alloys At Code Maximum Allowable Temperature
1/4 (6.4)	26 (660)	22 (559)
3/8 (9.5)	35 (889)	30 (762)
1/2 (12.7)	44 (1118)	38 (965)
5/8 (15.9)	52 (1321)	45 (1143)
3/4 (19.1)	60 (1524)	52 (1321)
7/8 (22.2)	69 (1753)	60 (1524)
1 (25.4)	74 (1880)	64 (1626)
1-1/4 (31.8)	88 (2235)	76 (1930)
1-1/2 (38.1)	100 (2540)	87 (2210)
2 (50.8)	125 (3175)	110 (2794)

En el caso en estudio la aleación empleada es Acero Carpenter 20 Mo-6, que es una aleación de níquel, cromo y hierro (y otros compuestos en menor proporción), y el diámetro externo de los tubos es 1,25 pulgadas.

Así se obtiene una distancia máxima entre deflectores de 88 pulgadas (2,235 m).

Para obtener la distancia entre deflectores se va a realizar la media aritmética entre los valores mínimo y máximo de distancia entre deflectores:

$$P_{def} = \frac{0,0508 \text{ m} + 2,235 \text{ m}}{2} = 1,1429 \text{ m}$$

Se aproxima este valor obtenido a una distancia entre deflectores de 1,2 m.



Usando la **Ecuación A.3.21** se obtiene:

$$N_c = \frac{0,61m}{1,1429m} = 0,508$$

Por lo tanto el intercambiador no necesita ninguna placa deflectora al ser el número muy inferior a uno.

### 3.9. Diseño mecánico

En el diseño mecánico se expondrán los cálculos realizados para la obtención de los espesores de tubo y de carcasa.

#### 3.9.1. Espesor de tubos

Para la determinación del espesor de los tubos debido a la presión interna se empleará la expresión que permite calcularlo mediante código ASME B.31.3. Este espesor se calcula igual para toda tubería de proceso. La ecuación es la que sigue:

$$t = \left( \frac{P_D \cdot D_0}{2 \cdot (S \cdot E + P_D \cdot Y)} + C \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - M/100} \right) \quad [\text{A.3.22}]$$

Siendo:

- E: eficiencia de soldadura
- S: tensión máxima permisible
- Y: coeficiente dependiente de la temperatura de operación y del material de los tubos
- P<sub>D</sub>: presión de diseño
- D<sub>0</sub>: diámetro externo de los tubos
- M: margen de tolerancia de fabricación
- C: margen por corrosión

Se determina a continuación cada uno de esos parámetros:

- Eficiencia de soldadura (E):  
Este término se refiere a la disminución de la resistencia del material de los tubos debido a que las uniones soldadas no son tan resistentes como el resto del material. Se observa en la tabla UW-12 del Código ASME VIII-Div.1 que E toma el valor de 1 para una junta a tope u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado por el interior y el exterior de los tubos.
- Tensión máxima admisible (S):  
Según se puede observar en la **Tabla A.13.10**, la tensión máxima admisible para acero Carpenter 20 Mo-6 es de 31000 psi para temperaturas que rondan los 600K (se escoge una temperatura inmediatamente superior a la temperatura máxima de los fluidos).

- Factor Y:  
Como se puede observar en la **Tabla A.13.13.** para Acero Carpenter 20 Mo-6 (otros metales dúctiles) a temperaturas inferiores a 900 °F el valor del término Y es 0,4.

- Presión de diseño ( $P_D$ ):  
La presión de diseño se calcula como la presión a la que se opera aumentada un 10%:

$$P_D = 1,1 \cdot 1,2 atm = 1,32 atm = 19,14 psi$$

- Diámetro exterior de los tubos ( $D_0$ ):  
El diámetro exterior de los tubos es 1,25 in.
- Margen de tolerancia a la fabricación (M):  
Las tuberías sin costura poseen un valor alto de tolerancia a la fabricación, en el caso en estudio este margen es de un 12,5%.
- Margen de corrosión (C):  
El Código ASME VII-Div.1 se debe tener en cuenta para diseñar las unidades de proceso que puedan estar sometidas a corrosión, erosión o abrasión mecánica un margen de corrosión, el cual predice el desgaste del espesor y así la vida útil del equipo sea la correcta. Para ello los cálculos pertinentes se deben de llevar a cabo en condiciones corroídas para garantizar la validez de estos cálculos.

Se considera un desgaste de corrosión para tuberías y depósitos de 5 milésimas de pulgada por año. Para los equipos principales (como es el caso) se usan vidas útiles de 15-20 años, usando aquí el valor de 15 años como vida útil del presente intercambiador. Se calcula a continuación el valor de C:

$$C = 15 \text{ años} \cdot 0,005 \text{ in/año} = 0,075 \text{ in} = 0,1905 \text{ cm}$$

Se puede ya el espesor de los tubos mediante la **Ecuación A.3.22**:

$$t = \left( \frac{19,14 psi \cdot 1 in}{2 \cdot (31000 psi \cdot 1 + 19,14 psi \cdot 0,4)} + 0,075 \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,0862 in$$

Se obtiene mediante la **Tabla A.13.6.** el espesor normalizado de 0,095 in que es el inmediatamente superior al espesor obtenido. Por lo tanto, los tubos serán 13 BWG (espesor 0,095 in, diámetro interior 1,06 in (0,0269 m)). Por lo tanto el diámetro interior coincide con el supuesto en el **Apartado 3.4.** del presente anexo.

### 3.9.2. Espesor de la carcasa

Para la determinación del espesor de la carcasa se deben indicar con anterioridad una serie de datos:

- **Espesor mínimo de pared:**  
Se debe escoger un espesor mínimo de pared tanto si se aplican las normas como los códigos. Así por la fórmula de aceros inoxidables:

$$t_{min} = 3mm$$

Por el Código ASME VII-Div 1:

$$t_{min} = 2,5 + C = 2,5mm + 1,905 mm = 4,405 mm$$

Se escoge de ambos el mayor espesor (4,405 mm).

- **Presión y temperaturas de diseño ( $P_D$  y  $T_D$ ):**  
La presión de diseño se considera la mayor de las siguientes presiones:
  - 30psi
  - Un 10% más de la de operación (en el caso en estudio 18,34 psi)

En este caso se escoge una presión de diseño de 30 psi.

La temperatura de diseño se calcula:

$$T_D = T_{max op} + 20^{\circ}C = (570 K - 273 K) + 20^{\circ}C = 317^{\circ}C = 602,6^{\circ}F$$

- **Tensión máxima admisible (S):**  
Según se puede observar en la **Tabla A.13.9.** la tensión máxima admisible para acero SA-240 es de 16600 psi para temperaturas que rondan los 650 °F (se escoge una temperatura inmediatamente superior a la temperatura de diseño).
- **Eficiencia de soldadura (E):**  
Se observa en la tabla UW-12 del código ASME VIII-Div.1 que E toma el valor de 0,85 para una junta a tope con doble cordón u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado, y siendo examinadas las juntas por zonas.

Antes de realizar ningún cálculo se deben conocer cuáles son las tensiones a las que se encuentra sometido el equipo en estudio.

**Tabla A.3.7.**

Tensiones que influyen en el equipo (Megyesy, E.F., 2001)

	Tensiones circunferenciales		Tensiones longitudinales	
	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión
<b>Carga</b>				
<b>Peso</b>				X
<b>Viento</b>			X	X
<b>Seísmo</b>			X	X
<b>Presión interior</b>	X		X	
<b>Presión exterior</b>				

Debido a que las tensiones debidas a sismos y a viento son despreciables frente a la ejercida por la presión interior, estas tensiones no se tendrán en cuenta en los cálculos, aunque al escoger el espesor normalizado de la carcasa se tendrá un sobredimensionamiento del espesor que cubrirá las tensiones despreciadas.

Según el Código ASME VII-Div. 1 existen dos tensiones diferentes en cuanto al cálculo del espesor debido a la presión interior: las tensiones circunferenciales y las tensiones longitudinales. Así, se calcularán ambos espesores y se usará el que sea mayor.

- Tensiones circunferenciales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{circ} = \frac{P_D \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_D} \quad [A.3.23]$$

Siendo:

E: eficiencia de soldadura  
S: tensión máxima permisible (psi)  
R: radio de la carcasa (in)  
P<sub>D</sub>: presión de diseño (psi)

Sustituyendo:

$$t_{circ} = \frac{30psi \cdot 19,5 in}{16600psi \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 30psi} = 0,042in = 1,054mm$$

- Tensiones longitudinales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{long} = \frac{P_D \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_D} \quad [A.3.24]$$

Sustituyendo:

$$t_{long} = \frac{30psi \cdot 19,5 in}{2 \cdot 16600psi \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 30psi} = 0,021in = 0,526mm$$

Se escoge el mayor espesor entre ambas, es decir,  $t = 0,042 in$ . A este valor se le suma el desgaste por corrosión:

$$t = 0,042in + 0,075in = 0,117 in = 2,959 mm$$

Como este valor de espesor es menor al espesor mínimo, se usará el valor del espesor mínimo. Se normaliza este valor de espesor y se obtiene:

$$t = 0,2 in = 0,508 cm = 0,00508 m$$

### 3.10. Pérdidas de carga

En este apartado se calcularán las pérdidas de carga tanto en tubos como en carcasa.

#### 3.10.1. Pérdidas de carga en tubos

La pérdida de carga en tubos se calcula mediante la ecuación de Fanning:

$$\Delta P = \frac{f \cdot G^2 \cdot L}{D_i \cdot \rho} \quad [\text{A.3.25}]$$

Siendo:

L: longitud de los tubos (m).

$D_i$ : diámetro interno de los tubos (m).

f: factor de fricción

$\rho$ : densidad del fluido que circula por los tubos ( $\text{kg/m}^3$ )

G: velocidad másica ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

La velocidad másica se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G = \frac{4 \cdot M \cdot n_t}{\pi \cdot D_i^2 \cdot N_t} \quad [\text{A.3.26}]$$

Siendo:

M: caudal másico ( $\text{kg/s}$ )

$n_t$ : número de pasos por tubos

$N_t$ : número de tubos

$D_i$ : diámetro interno de los tubos (m).

Sustituyendo en la **Ecuación A.3.26**:

$$G = \frac{4 \cdot 4,316 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,0269 \text{ m})^2 \cdot 352} = 21,27 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Para obtener el factor de fricción se necesita del uso del valor del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Así el número de Reynolds se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{G \cdot D_i}{\mu}$$

$$Re = \frac{G \cdot D_i}{\mu} = \frac{21,57 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot 0,0269 \text{ m}}{2,267 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 2,56 \cdot 10^4$$

La rugosidad relativa para el diámetro de tubo escogido y aceros comerciales es de 0,0003. Con estos datos en la gráfica de Moody se obtiene un valor de factor de fricción igual a 0,0245.

Sustituyendo en la **Ecuación A.3.25**:

$$\Delta P = \frac{0,0245 \cdot \left( 21,57 \frac{kg}{m^2 \cdot s} \right)^2 \cdot 0,61m}{0,0269m \cdot 0,92kg/m^3} = 281,09Pa = 2,77 \cdot 10^{-3}atm$$

Por tanto la presión de salida del fluido que va por tubos es prácticamente a la que entró debido a que las pérdidas de carga son muy pequeñas:

$$P_{sal} = 1,2 atm$$

### 3.10.2. Pérdidas de carga en carcasa

Las pérdidas de carga en carcasa se obtienen mediante el método de CERN:

$$\Delta P = \frac{f_c \cdot G_c^2 \cdot (N_c + 1) \cdot D_c}{D_e \cdot \rho} \quad [A.3.27]$$

Siendo:

$f_c$ : factor de fricción en carcasa.

$G_c$ : velocidad másica en carcasa ( $kg/m^2 \cdot s$ ).

$N_c$ : número de deflectores.

$D_c$ : diámetro de la carcasa (m)

$D_e$ : diámetro equivalente (m)

La velocidad másica en carcasa se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G_c = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot (D_c^2 - N_t \cdot D_0^2) \cdot X} \quad [A.3.28]$$

Siendo M el caudal másico del fluido que circula por la carcasa y X el cociente entre el pitch y el diámetro exterior de los tubos:

$$X = \frac{pitch}{D_0} = \frac{1,5625in}{1,25in} = 1,25$$

Sustituyendo en la **Ecuación A.3.28**:

$$G_c = \frac{4 \cdot 4,317kg/s}{\pi \cdot ((0,9906m)^2 - 352 \cdot (0,03175m)^2) \cdot 1,33} = 7,02 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$$

El factor de fricción necesita del cálculo del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Así, el número de Reynolds:

$$Re = \frac{G_c \cdot D_c}{\mu} = \frac{7,02 \frac{kg}{m^2 \cdot s} \cdot 0,9906m}{2,207 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s} = 3,15 \cdot 10^5$$

Conociendo que la rugosidad relativa para ese diámetro de carcasa y acero comerciales es de 0,00015, se obtiene del gráfico de Moody un valor de factor de fricción de 0,0165.

Para disposición cuadrada la determinación del diámetro equivalente se sigue la siguiente ecuación:

$$D_e = \frac{4 \cdot pitch^2}{\pi \cdot D_0} - D_0 \quad [A.3.29]$$

$$D_e = \frac{4 \cdot (0,0397m)^2}{\pi \cdot 0,03175m} - 0,03175m = 0,0314m$$

Sustituyendo en la **Ecuación A.3.27**:

$$\Delta P = \frac{0,0165 \cdot \left( 7,02 \frac{kg}{m^2 \cdot s} \right)^2 \cdot (1 + 0) \cdot 0,9906m}{0,0314m \cdot 0,97kg/m^3} = 26,428Pa = 2,61 \cdot 10^{-4} atm$$

Por lo tanto, al ser la pérdida de carga en carcasa tan pequeña, la presión de salida del fluido que pasa por carcasa será prácticamente la misma a la que entró, es decir, 1,15 atm.

La pérdida de carga total, al ser ambas pérdidas de carga tan pequeñas, es despreciable.

### 3.11. Material de aislamiento

Se usará como material de aislamiento del intercambiador lana de roca por ser económica y cumplir los requerimientos del equipo. Mediante la **Tabla A.13.18**, se obtiene que el espesor de lana de roca necesario debe ser de 80 mm para las condiciones a las que opera el intercambiador. Después el aislamiento de lana de roca se cubrirá con planchas de aluminio.

## ANEXO 4: Diseño del intercambiador IC-02

El intercambiador IC-02 es el que se encarga de calentar la corriente proveniente del intercambiador IC-01 que se dirige a la entrada al reactor R-01 mediante un intercambio de calor con un vapor sobrecalentado de agua. Dicho vapor proviene del intercambiador I-03 del PFC “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Diseño del proceso de obtención de metanol a partir de gas natural**”, y este vapor enfriado será devuelto otra vez a su origen para diversas aplicaciones.

Como se comentó en la memoria, este intercambiador será de carcasa y tubos. A continuación estarán definidos los cálculos realizados para su diseño.

### 4.1. Características de las corrientes de entrada

El fluido frío posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{ent}$ ): 544,07 K
- ✓ Temperatura de salida ( $T_{sal}$ ): 570 K
- ✓ Temperatura media ( $T_{med}$ ): 557,035 K
- ✓ Viscosidad media ( $\mu$ ):  $2,662 \cdot 10^{-5}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ): 0,73 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Conductividad térmica ( $k$ ): 0,038 W/m·K
- ✓ Número de Prandtl (Pr): 0,867
- ✓ Presión de entrada (P): 1,145 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{molar}$ ): 151,595 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 4,317 kg/s

Las propiedades tomadas anteriormente (excepto las temperaturas, presión y caudales) se han tomado como la media ponderada de las propiedades de cada compuesto. Las propiedades de cada compuesto se han realizado como la media aritmética de las propiedades de tal compuesto a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida.

El fluido caliente posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{ent}$ ): 610 K
- ✓ Temperatura de salida ( $T_{sal}$ ): 580 K



- ✓ Temperatura media ( $T_{med}$ ): 595 K
- ✓ Viscosidad media( $\mu$ ):  $1,365 \cdot 10^{-5}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ): 0,77 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Conductividad térmica (k): 0,038 W/m·K
- ✓ Número de Prandtl (Pr): 0,741
- ✓ Presión entrada (P): 1,15 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{molar}$ ): 113,858 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 2,049 kg/s

Al igual que con el fluido frío, Las propiedades se han realizado como la media aritmética de las propiedades a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida.

## 4.2. Asignación de flujos

Los criterios en los que se basa la asignación de flujos en el intercambiador se encuentran en el **Apartado 7.1.3.** de la **Memoria Descriptiva** del presente Proyecto Fin de Carrera. Según estos criterios ambas corrientes pueden circular tanto por la carcasa o por los tubos (poseen corrosividades parecidas, no producen incrustaciones, las presiones de alimentación son muy parecidas, etc.). Por ello se ha escogido, arbitrariamente, que la corriente caliente será la que deberá ir por los tubos.

## 4.3. Cálculo del caudal de vapor necesario

Para el diseño del presente intercambiador de calor se supuso una temperatura de salida del fluido caliente para poder obtener el caudal necesario de éste. Realizando un balance de energía a la corriente fría se obtiene:

$$Q = W_{frío} \cdot c_{pfrío} \cdot \Delta T \quad [A.4.1]$$

Siendo  $W_{frío}$  el caudal del fluido,  $c_{pfrío}$  su capacidad calorífica y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas que sufre la corriente.  $c_{pfrío}$  se calculará como la suma de todas las capacidades caloríficas promediadas sobre el total.

Aplicando las ecuaciones del **Apartado 2.1.** del **Anexo 2** se obtienen los valores de  $c_p$  medio (se obtienen estos valores como la media aritmética entre el valor a la temperatura inicial y el valor a la temperatura final):

**Tabla A.4.1.**

Capacidades caloríficas medias de a corriente caliente

Capacidades caloríficas medias (cal/mol·K)	
$c_p(\text{O}_2)$	7,808
$c_p(\text{H}_2)$	7,071
$c_p(\text{N}_2)$	7,090
$c_p(\text{MeOH})$	13,413

Pasando las  $c_p$  medias a Julios, y como se conocen las composiciones molares, se calcula la  $c_p$  promedio, que tiene un valor igual a 31,906 J/mol·K. Sustituyendo en la **Ecuación A.4.1** se obtiene:

$$Q = 1,25 \cdot 10^5 \text{ J/s}$$

Se realiza un balance de energía al fluido caliente:

$$Q = W_{cal} \cdot c_{pcal} \cdot \Delta T \quad [\text{A.4.2}]$$

Siendo  $W_{cal}$  el caudal del fluido,  $c_{pcal}$  su capacidad calorífica y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas que sufre la corriente.

Aplicando las ecuaciones del **Apartado 2.1.** del **Anexo 2** se obtienen los valores de  $c_p$  medio (se obtienen estos valores como la media aritmética entre el valor a la temperatura inicial y el valor a la temperatura final). Así se obtiene una  $c_{pcal}$  igual a 8,784 cal/mol·K.

Pasando la  $c_p$  media a Julios, y como se conocen  $Q$  y la diferencia de temperaturas que sufre el fluido caliente, se puede obtener finalmente el caudal de vapor requerido:

$$W_{cal} = \frac{-Q}{c_{pcal} \cdot \Delta T} = \frac{-1,25 \cdot 10^5 \text{ J/s}}{36,717 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \cdot (580\text{K} - 610\text{K})} = 113,858 \text{ mol/s} = 2,049 \text{ kg/s}$$

#### 4.4. Características del intercambiador

Se van a tomar las siguientes consideraciones para el diseño del intercambiador:

- Se escogerá un intercambiador de carcasa y tubos con un paso por carcasa y un paso por tubos.
- La carcasa y los tubos, al no estar en contacto con formaldehído, se construirán de Acero SA-240 (AISI 316L).
- El diámetro exterior de los tubos será de 5/4 de pulgada (1,25 in) y el diámetro interno será de 1,06 pulgadas (posteriormente se comprobará este diámetro).
- Los tubos estarán en configuración cuadrada con un pitch (o separación entre tubos) de 1 y 9/16 de pulgada (1,5625 in).

#### 4.5. Coeficiente global de transferencia de calor

Como se comentó en el **Apartado 3.5.** del **Anexo 3**, se puede definir el calor mediante la siguiente ecuación:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad [A.4.3]$$

Siendo U el coeficiente global de transferencia de calor:

$$\frac{1}{U} = \frac{D_o}{h_i \cdot D_i} + \frac{D_o \cdot \ln(r_o/r_i)}{2 \cdot k} + \frac{1}{h_o} \quad [A.4.4]$$

A continuación se calcularán los términos de la anterior ecuación

##### Coeficiente individual de convección interna ( $h_i$ )

El coeficiente individual de convección interna se obtiene mediante la definición del número de Nusselt:

$$Nu_d = \frac{h_i \cdot D_i}{k} \quad [A.4.5]$$

Siendo  $h_i$  el coeficiente individual de convección interna,  $k$  la conductividad de la sustancia y  $D_i$  el diámetro interior del tubo.

Primero se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{4 \cdot W_m}{\mu \cdot \pi \cdot D_i} \quad [A.4.6]$$

Siendo  $W_m$  el caudal másico del fluido que circula por el interior de los tubos,  $\mu$  la viscosidad de este fluido y  $D_i$  el diámetro interior del tubo. Como se tienen todas las propiedades (se encuentran al inicio del presente apartado de este Anexo) se calcula el valor de este número:

$$Re = \frac{4 \cdot 2,049 \text{ kg/s}}{1,365 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \pi \cdot 0,0269 \text{ m}} = 7,104 \cdot 10^6$$

Como el valor del número de Reynolds es mayor a 10.000 el fluido en el interior de los tubos está en flujo turbulento. Se emplea la siguiente expresión para calcular el número de Nusselt (Mendia Urquiola, 1994):

$$Nu_d = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,3} \quad [A.4.7]$$

El exponente al que se encuentra elevado el número de Prandtl es 0,3 porque es el exponente que se usa para cuando la pared de los tubos se encuentra a menor temperatura que el fluido que circula por el interior de los tubos.

Mediante la **Ecuación A.4.7** se obtiene:

$$Nu_d = 0,023 \cdot (7,104 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot 0,741^{0,3} = 6365,84$$

Se usa ahora la **Ecuación A.4.5** y se obtiene el valor del coeficiente individual de convección interna:

$$h_i = \frac{Nu_d \cdot k}{D_i} = \frac{6365,84 \cdot 0,038 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{0,0269 \text{ m}} = 8937,10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### Coeficiente individual de convección externa ( $h_0$ )

El coeficiente individual de convección externa se obtiene de la misma manera que el coeficiente individual de convección interna pero mediante las siguientes ecuaciones:

$$Nu_d = \frac{h_0 \cdot D_0}{k} \quad [\text{A.4.8}]$$

$$Re = \frac{4 \cdot W_m}{\mu \cdot \pi \cdot D_0} \quad [\text{A.4.9}]$$

Como se tienen todas las propiedades (se encuentran al inicio del presente apartado de este Anexo) se calcula el valor de este número:

$$Re = \frac{4 \cdot 4,317 \text{ kg/s}}{2,662 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \pi \cdot 0,03175 \text{ m}} = 6,503 \cdot 10^6$$

Como el valor del número de Reynolds es mayor a 10.000 el fluido en el exterior de los tubos está en flujo turbulento. Se emplea la siguiente expresión para calcular el número de Nusselt (Mendia Urquiola, 1994):

$$Nu_d = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,3} \quad [\text{A.4.10}]$$

Mediante la **Ecuación A.4.10** se obtiene:

$$Nu_d = 0,023 \cdot (6,503 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot 0,867^{0,3} = 6217,93$$

Se usa ahora la **Ecuación A.4.8** y se obtiene el valor del coeficiente individual de convección externa:

$$h_0 = \frac{Nu_d \cdot k}{D_0} = \frac{6217,93 \cdot 0,038 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{0,03175 \text{ m}} = 7362,15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### Conductividad del material ( $k$ )

La conductividad del material (Acero SA-240) se obtiene de la **Tabla A.13.21**, e interpolando entre las temperaturas de entrada y salida de los fluidos se tiene:

$$k = 16,36 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

Ya obtenidos estos parámetros se puede calcular el coeficiente global de transferencia de calor mediante la **Ecuación A.4.4**. Sustituyendo los valores se obtiene:

$$U = 2332,37 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

#### 4.6. Cálculo del área de intercambio de calor

Mediante la **Ecuación A.4.3** se puede obtener el área de intercambio de calor si conocemos tanto U (coeficiente global de transferencia de calor, calculado en el **Apartado 4.5.** del presente anexo), Q (calor intercambiado, calculado en el **Apartado 4.3.** del presente anexo) y  $\Delta T_{ml}$  (diferencia de temperatura media logarítmica).

Por ello se procede al cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica, que se define como:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{cale} - T_{frío_s}) - (T_{cal_s} - T_{frío_e})}{\ln\left(\frac{T_{cale} - T_{frío_s}}{T_{cal_s} - T_{frío_e}}\right)} \quad [\text{A.4.11}]$$

Mediante la sustitución de las temperaturas se obtiene:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(610\text{K} - 570\text{K}) - (580\text{K} - 544,07\text{K})}{\ln\left(\frac{610\text{K} - 570\text{K}}{580\text{K} - 544,07\text{K}}\right)} = 29,66 \text{ K}$$

Ya se puede calcular el área de intercambio de calor mediante la **Ecuación A.4.3**:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{1,250 \cdot 10^5 \text{ J/s}}{2332,37 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 29,66\text{K}} = 1,807 \text{ m}^2$$

#### 4.7. Número y longitud de los tubos

La ecuación que permite el cálculo del número de los tubos es la siguiente:

$$N_{tubos} = \frac{m_f}{v \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \rho} \quad [\text{A.4.12}]$$

Siendo v la velocidad de paso del fluido por el interior de los tubos,  $\rho$  la densidad de ese fluido y  $m_f$  el caudal másico del fluido (lo que hemos denominado anteriormente como W).

Se usa una velocidad que se encuentre en el rango de velocidades comunes para la condiciones del fluido con el que estamos operando. En nuestro caso, el fluido es un vapor a baja presión, y según la **Tabla A.13.12.**, el rango de velocidades para dicho caso es de 12000-15000 ft/min. Se escoge un valor medio aproximado de 250 ft/s (76,2 m/s).

Así se obtiene:

$$N_{tubos} = \frac{2,049 \text{ kg/s}}{76,2 \text{ m/s} \cdot \frac{\pi \cdot (0,0269)^2 \text{ m}^2}{4} \cdot 0,77 \text{ kg/m}^3} = 61,34$$

Por lo tanto se necesitan como mínimo 62 tubos, mediante la **Tabla A.13.5.** se obtiene para configuración cuadrada con un paso por tubos y un diámetro exterior de tubo de 1,25 pulgadas un número de tubos igual a 73. Con estas características se obtiene un diámetro de carcasa de 19,5 pulgadas (0,4953 m) y un pitch de una pulgada y 9/16 (0,0397 m).

Se calcula a continuación la longitud de los tubos mediante la ecuación de definición del área de un cilindro aplicada al conjunto de los tubos:

$$A_0 = \pi \cdot D_0 \cdot N \cdot L \quad [A.4.13]$$

Se sustituyen los términos y se obtiene:

$$L = \frac{A_0}{\pi \cdot D_0 \cdot N} = \frac{1,807 \text{ m}^2}{\pi \cdot 0,03175 \text{ m} \cdot 73} = 0,248 \text{ m} = 0,814 \text{ ft}$$

Por tanto, se tomará una longitud normalizada de 1 pie (0,3048 m) para la longitud de los tubos.

#### 4.8. Tamaño de carcasa y deflectores

Como se comentó anteriormente el diámetro de la carcasa es de 19,5 pulgadas (0,4953 m).

El número de deflectores se calcula mediante la ecuación:

$$N_c = \frac{L}{P_{def}} \quad [A.4.14]$$

Donde L es la longitud de los tubos y  $P_{def}$  es la distancia entre deflectores

En las normas T.E.M.A. existen un criterio para la determinación de la distancia mínima y máxima entre deflectores. Así la distancia mínima entre deflectores se define como la mayor de las distancias siguientes:

- 2 pulgadas (0,0508 m)
- 1/5 del diámetro de la carcasa (0,0508 m)

En este caso ambos valores son los mismos, por lo que la distancia mínima entre deflectores será de 0,508 m.

La distancia máxima entre deflectores se determina mediante la siguiente tabla:

**Tabla A.4.2.**

Normas T.E.M.A.: Separación máxima entre deflectores

Tube OD	Tube Materials and Temperature Limits °F (°C)	
	Carbon Steel & High Alloy Steel, 759 (399) Low Alloy Steel, 850 (454) Nickel-Copper, 600 (316) Nickel, 850 (464) Nickel-Chromium-Iron, 1000 (538)	Aluminum & Aluminum Alloys, Copper & Copper Alloys, Titanium Alloys At Code Maximum Allowable Temperature
1/4 (6.4)	26 (660)	22 (559)
3/8 (9.5)	35 (889)	30 (762)
1/2 (12.7)	44 (1118)	38 (965)
5/8 (15.9)	52 (1321)	45 (1143)
3/4 (19.1)	60 (1524)	52 (1321)
7/8 (22.2)	69 (1753)	60 (1524)
1 (25.4)	74 (1880)	64 (1626)
1-1/4 (31.8)	88 (2235)	76 (1930)
1-1/2 (38.1)	100 (2540)	87 (2210)
2 (50.8)	125 (3175)	110 (2794)

En el caso en estudio la aleación empleada es Acero SA-240 y el diámetro externo de los tubos es 1,25 pulgadas. Así se obtiene una distancia máxima entre deflectores de 88 pulgadas (2,235 m).

Para obtener la distancia entre deflectores se va a realizar la media aritmética entre los valores mínimo y máximo de distancia entre deflectores:

$$P_{def} = \frac{0,0508 \text{ m} + 2,235 \text{ m}}{2} = 1,1429 \text{ m}$$

Se aproxima este valor obtenido a una distancia entre deflectores de 1,2 m.

Usando la **Ecuación A.4.14** se obtiene:

$$N_c = \frac{0,3048 \text{ m}}{1,2 \text{ m}} = 0,25$$

Por lo tanto en el presente intercambiador no se instalarán placas deflectoras debido a que el resultado obtenido es mucho menor a 1.

## 4.9. Diseño mecánico

En el diseño mecánico se expondrán los cálculos realizados para la obtención de los espesores de tubo y de carcasa.

### 4.9.1. Espesor de tubos

Para la determinación del espesor de los tubos debido a la presión interna se empleará la expresión que permite calcularlo mediante código ASME B.31.3. Este espesor se calcula igual para toda tubería de proceso. La ecuación es la que sigue:

$$t = \left( \frac{P_D \cdot D_0}{2 \cdot (S \cdot E + P_D \cdot Y)} + C \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - M/100} \right) \quad [\text{A.4.15}]$$

Siendo:

E: eficiencia de soldadura

S: tensión máxima permisible

Y: coeficiente dependiente de la temperatura de operación y del material de los tubos

$P_D$ : presión de diseño

$D_0$ : diámetro externo de los tubos

M: margen de tolerancia de fabricación

C: margen por corrosión

Se determina a continuación cada uno de esos parámetros:

- Eficiencia de soldadura (E):  
Se observa en la tabla UW-12 del Código ASME VIII-Div.1 que E toma el valor de 1 para una junta a tope u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado por el interior y el exterior de los tubos.
- Tensión máxima admisible (S):  
Según se puede observar en la **Tabla A.13.9.** la tensión máxima admisible para Acero SA-240 es de 16300 psi para temperaturas que rondan los 700 °F (se escoge una temperatura inmediatamente superior a la temperatura máxima de los fluidos).
- Factor Y:  
Como se puede observar en la **Tabla A.13.13.** para Acero SA-240 a temperaturas inferiores a 900 °F el valor del término Y es 0,4.
- Presión de diseño ( $P_D$ ):  
La presión de diseño se calcula como la presión a la que se opera aumentada un 10%:

$$P_D = 1,1 \cdot 1,15 \text{ atm} = 1,265 \text{ atm} = 18,34 \text{ psi}$$

- Diámetro exterior de los tubos ( $D_0$ ):  
El diámetro exterior de los tubos es 1,25 in.
- Margen de tolerancia a la fabricación (M):  
Las tuberías sin costura poseen un valor alto de tolerancia a la fabricación, en el caso en estudio este margen es de un 12,5%.
- Margen de corrosión (C):  
El Código ASME VII-Div.1 se debe tener en cuenta para diseñar las unidades de proceso que puedan estar sometidas a corrosión, erosión o abrasión mecánica un margen de corrosión, el cual predice el desgaste del espesor y así la vida útil del equipo sea la



correcta. Para ello los cálculos pertinentes se deben de llevar a cabo en condiciones corroídas para garantizar la validez de estos cálculos.

Se considera un desgaste de corrosión para tuberías y depósitos de 5 milésimas de pulgada por año. Para los equipos principales (como es el caso) se usan vidas útiles de 15-20 años, usando aquí el valor de 15 años como vida útil del presente intercambiador. Se calcula a continuación el valor de C:

$$C = 15 \text{ años} \cdot 0,005 \text{ in/año} = 0,075 \text{ in} = 0,1905 \text{ cm}$$

Se puede ya calcular el espesor de los tubos mediante la **Ecuación A.4.15**:

$$t = \left( \frac{18,34 \text{ psi} \cdot 1,25 \text{ in}}{2 \cdot (16300 \text{ psi} \cdot 1 + 18,34 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,0865 \text{ in}$$

Se obtiene mediante la **Tabla A.13.6.** el espesor normalizado de 0,095 in que es el inmediatamente superior al espesor obtenido. Por lo tanto, los tubos serán 13 BWG (espesor 0,095 in, diámetro interior 1,06 in (0,0143 m)). Por lo tanto el diámetro interior coincide con el supuesto en el **Apartado 4.4.** del presente Anexo.

#### 4.9.2. Espesor de la carcasa

Para la determinación del espesor de la carcasa se deben indicar con anterioridad una serie de datos:

- Espesor mínimo de pared:  
Se debe escoger un espesor mínimo de pared tanto si se aplican las normas como los códigos. Así por la fórmula de aceros inoxidables:

$$t_{min} = 3 \text{ mm}$$

Por el Código ASME VII-Div 1:

$$t_{min} = 2,5 + C = 2,5 \text{ mm} + 1,905 \text{ mm} = 4,405 \text{ mm}$$

Se escoge de ambos el mayor espesor (4,405 mm).

- Presión y temperaturas de diseño ( $P_D$  y  $T_D$ ):  
La presión de diseño se considera la mayor de las siguientes presiones:
  - 30psi
  - Un 10% más de la de operación (en el caso en estudio 18,26 psi)

En este caso se escoge una presión de diseño de 30 psi.

La temperatura de diseño se calcula:

$$T_D = T_{\max op} + 20^\circ C = (610 K - 273 K) + 20^\circ C = 357^\circ C = 674,6^\circ F$$

- Tensión máxima admisible (S):  
Según se puede observar en la **Tabla A.13.9.** la tensión máxima admisible para acero SA-240 es de 16300 psi para temperaturas que rondan los 700 °F (se escoge una temperatura inmediatamente superior a la temperatura de diseño).
- Eficiencia de soldadura (E):  
Se observa en la tabla UW-12 del código ASME VIII-Div.1 que E toma el valor de 0,85 para una junta a tope con doble cordón u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado, y siendo examinadas las juntas por zonas.

Antes de realizar ningún cálculo se deben conocer cuáles son las tensiones a las que se encuentra sometido el equipo en estudio.

**Tabla A.4.4.**

Tensiones que influyen en el equipo (Megyesy, E.F., 2001)

Carga	Tensiones circunferenciales		Tensiones longitudinales	
	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión
<b>Peso</b>				<b>X</b>
<b>Viento</b>			<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Seísmo</b>			<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Presión interior</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	
<b>Presión exterior</b>				

Debido a que las tensiones debidas a seísmos y a viento son despreciables frente a la ejercida por la presión interior, estas tensiones no se tendrán en cuenta en los cálculos, aunque al escoger el espesor normalizado de la carcasa se tendrá un sobredimensionamiento del espesor que cubrirá las tensiones despreciadas.

Según el Código ASME VII-Div. 1 existen dos tensiones diferentes en cuanto al cálculo del espesor debido a la presión interior: las tensiones circunferenciales y las tensiones longitudinales. Así, se calcularán ambos espesores y se usará el que sea mayor.

- Tensiones circunferenciales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{circ} = \frac{P_D \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_D} \quad [A.4.16]$$

Siendo:

- E: eficiencia de soldadura
- S: tensión máxima permisible (psi)
- R: radio de la carcasa (in)
- P<sub>D</sub>: presión de diseño (psi)

Sustituyendo:

$$t_{circ} = \frac{30psi \cdot 9,75 in}{16300psi \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 30psi} = 0,021in = 0,537mm$$

- Tensiones longitudinales

Se usa la siguiente expresión:

$$t_{long} = \frac{P_D \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_D} \quad [A.4.17]$$

Sustituyendo:

$$t_{long} = \frac{30psi \cdot 9,75 in}{2 \cdot 16300psi \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 30psi} = 0,011in = 0,268mm$$

Se escoge el mayor espesor entre ambas, es decir,  $t = 0,021 in$ . A este valor se le suma el desgaste por corrosión:

$$t = 0,021in + 0,075in = 0,096 in = 2,4384 mm$$

Como este valor de espesor es menor al espesor mínimo, se usará el valor del espesor mínimo. Se normaliza este valor de espesor y se obtiene:

$$t = 0,2 in = 0,508 cm = 0,00508 m$$

#### 4.10. Pérdidas de carga

En este apartado se calcularán las pérdidas de carga tanto en tubos como en carcasa.

##### 4.10.1. Pérdidas de carga en tubos

La pérdida de carga en tubos se calcula mediante la ecuación de Fanning:

$$\Delta P = \frac{f \cdot G^2 \cdot L}{D_i \cdot \rho} \quad [A.4.18]$$

Siendo:

L: longitud de los tubos (m).

$D_i$ : diámetro interno de los tubos (m).

f: factor de fricción

$\rho$ : densidad del fluido que circula por los tubos ( $kg/m^3$ )

G: velocidad másica ( $kg/m^2 \cdot s$ )

La velocidad másica se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G = \frac{4 \cdot M \cdot n_t}{\pi \cdot D_i^2 \cdot N_t} \quad [\text{A.4.19}]$$

Siendo:

M: caudal másico (kg/s)  
 $n_t$ : número de pasos por tubos  
 $N_t$ : número de tubos  
 $D_i$ : diámetro interno de los tubos (m).

Sustituyendo en la **Ecuación A.4.19**:

$$G = \frac{4 \cdot 2,049 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,0269 \text{ m})^2 \cdot 73} = 49,39 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Para obtener el factor de fricción se necesita del uso del valor del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Así el número de Reynolds se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{G \cdot D_i}{\mu}$$

$$Re = \frac{G \cdot D_i}{\mu} = \frac{49,39 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot 0,0269 \text{ m}}{1,365 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 9,73 \cdot 10^4$$

La rugosidad relativa para el diámetro de tubo escogido y aceros comerciales es de 0,0003. Con estos datos en la gráfica de Moody se obtiene un valor de factor de fricción igual a 0,019.

Sustituyendo en la **Ecuación A.4.18**:

$$\Delta P = \frac{0,019 \cdot \left( 49,39 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \right)^2 \cdot 0,3048 \text{ m}}{0,0269 \text{ m} \cdot 0,77 \text{ kg/m}^3} = 681,99 \text{ Pa} = 6,73 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$$

Por tanto la presión de salida del fluido que va por tubos es:

$$P_{sal} = P_{ent} - \Delta P = 1,15 \text{ atm} - 0,007 \text{ atm} = 1,143 \text{ atm}$$

#### 4.10.2. Pérdidas de carga en carcasa

Las pérdidas de carga en carcasa se obtienen mediante el método de CERN:

$$\Delta P = \frac{f_c \cdot G_c^2 \cdot (N_c + 1) \cdot D_c}{D_e \cdot \rho} \quad [\text{A.4.20}]$$

Siendo:

$f_c$ : factor de fricción en carcasa.  
 $G_c$ : velocidad másica en carcasa (kg/m<sup>2</sup>·s).

$N_c$ : número de deflectores.

$D_c$ : diámetro de la carcasa (m)

$D_e$ : diámetro equivalente (m)

La velocidad másica en carcasa se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G_c = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot (D_c^2 - N_t \cdot D_0^2) \cdot X} \quad [\text{A.4.21}]$$

Siendo M el caudal másico del fluido que circula por la carcasa y X el cociente entre el pitch y el diámetro exterior de los tubos:

$$X = \frac{\text{pitch}}{D_0} = \frac{1,5625 \text{ in}}{1,25 \text{ in}} = 1,25$$

Sustituyendo en la **Ecuación A.4.21**:

$$G_c = \frac{4 \cdot 4,317 \text{ kg/s}}{\pi \cdot ((0,4953 \text{ m})^2 - 73 \cdot (0,03175 \text{ m})^2) \cdot 1,25} = 25,61 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

El factor de fricción necesita del cálculo del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Así, el número de Reynolds:

$$Re = \frac{G_c \cdot D_c}{\mu} = \frac{25,61 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot 0,4953 \text{ m}}{2,662 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 4,76 \cdot 10^5$$

Conociendo que la rugosidad relativa para ese diámetro de carcasa y acero comerciales es de 0,00015, se obtiene del gráfico de Moody un valor de factor de fricción de 0,016.

Para disposición cuadrada la determinación del diámetro equivalente se sigue la siguiente ecuación:

$$D_e = \frac{4 \cdot \text{pitch}^2}{\pi \cdot D_0} - D_0 \quad [\text{A.4.22}]$$

$$D_e = \frac{4 \cdot (0,0397 \text{ m})^2}{\pi \cdot 0,03175 \text{ m}} - 0,03175 \text{ m} = 0,0314 \text{ m}$$

Sustituyendo en la **Ecuación A.4.20**:

$$\Delta P = \frac{0,016 \cdot \left( 25,61 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \right)^2 \cdot (0 + 1) \cdot 0,4953 \text{ m}}{0,0314 \text{ m} \cdot 0,73 \text{ kg/m}^3} = 226,562 \text{ Pa} = 2,24 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$$

Por lo tanto, al ser la pérdida de carga en carcasa tan pequeña, la presión de salida del fluido que pasa por carcasa será prácticamente la misma a la que entró, es decir, 1,145 atm.

La pérdida de carga total, por tanto será:

$$\Delta P = 2,24 \cdot 10^{-3} \text{ atm} + 6,73 \cdot 10^{-3} \text{ atm} = 8,97 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$$

#### 4.11. Material de aislamiento

Se usará como material de aislamiento del intercambiador lana de roca por ser económica y cumplir los requerimientos del equipo. Mediante la **Tabla A.13.18.** se obtiene que el espesor de lana de roca necesario debe ser de 80 mm para las condiciones a las que opera el intercambiador. Después el aislamiento de lana de roca se cubrirá con planchas de aluminio.

## ANEXO 5: Diseño del reactor R-01

El reactor R-01 es la unidad básica del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol debido a que es aquí donde se produce la reacción entre el oxígeno y el metanol para formar formaldehído y agua. La corriente de entrada al reactor proviene del IC-02, donde ha sido calentada a la temperatura deseada, y la corriente de salida se dirigirá al IC-01 donde será enfriada. Como se comentó en la memoria, este reactor será de tipo multitubular. A continuación estarán definidos los cálculos realizados para su diseño.

### 5.1. Ecuaciones de balance

En este apartado se expondrán los desarrollos matemáticos que, a partir de la ecuación general de balance expuesta en el **Apartado 1.1.** de los anexos del presente proyecto, mediante los cuales se llegarán a obtener las ecuaciones simplificadas de balance de materia y energía que se van a emplear en el diseño del reactor.

#### 5.1.1. Balance de materia

Como se expuso en el **Apartado 1.1.** de los anexos del presente proyecto, en la ecuación de balance de materia general no se usará el término de acumulación, y en el reactor sí se deberán usar los términos referentes a generación y consumo. Por tanto la ecuación simplificada será:

$$(E) + (G) = (S) + (C) \quad [A.5.1]$$

Siendo (E) el cómputo de las entradas al reactor, (G) la generación, (S) las salidas y (C) el consumo. En el reactor se va a usar como compuesto de referencia un reactivo, por lo que el término de generación se eliminará, quedando:

$$(E) = (S) + (C) \quad [A.5.2]$$

Al aplicar las expresiones de cada uno de los términos, éstos se desglosarán en varias partes, por ello se van a tomar en consideración algunas simplificaciones para hallar la ecuación simplificada. Así, en este reactor se van a considerar las dispersiones axiales y radiales despreciables. Para poder obviar estas dispersiones se deben cumplir una serie de requisitos: debe existir una buena mezcla del fluido en cualquier posición  $z$  del reactor (dispersión radial despreciable), y se debe cumplir que el valor de  $L_{\text{Lecho}}/d_p > 50$  (dispersión axial despreciable).

En el reactor se supondrá que en cualquier posición  $z$  la mezcla será homogénea (por lo tanto se obviará la dispersión radial), y se realizará el cálculo del reactor obviando la dispersión axial, y después se comprobará si la suposición fue válida (es decir, si el valor de  $L_{\text{Lecho}}/d_p$  es mayor a 50).

Con estas consideraciones se desarrollarán los términos de la **Ecuación A.5.2:**

$$(E) = |u \cdot C_A|_z \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta r \quad [A.5.3]$$

$$(S) = |u \cdot C_A|_{z+\Delta z} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta r \quad [A.5.4]$$

$$(C) = (-r_A)' \cdot \rho_L \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta r \cdot \Delta z \cdot (1 - \varepsilon_L) \quad [A.5.5]$$

Siendo  $u$  la velocidad del fluido,  $(-r_A)'$  la velocidad de reacción referida a la unidad de masa del catalizador,  $r$  es el diámetro del elemento diferencial escogido,  $\Delta r$  y  $\Delta z$  son los incrementos diferenciales del radio y la altura del elemento de volumen,  $C_A$  es la concentración del reactivo limitante,  $\rho_L$  la densidad del lecho y  $\varepsilon_L$  es la porosidad del lecho.

Agrupando los términos y dividiendo por  $2 \cdot \pi \cdot \Delta r \cdot \Delta z$  la expresión queda:

$$r \cdot \frac{|u \cdot C_A|_{z+\Delta z} - |u \cdot C_A|_z}{\Delta z} = (-r_A)' \cdot r \cdot \rho_L \cdot (1 - \varepsilon_L) \quad [A.5.6]$$

Desarrollando la derivada y simplificando se obtiene:

$$u \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} + C_A \cdot \frac{\partial u}{\partial z} = (-r_A)' \cdot \rho_L \cdot (1 - \varepsilon_L) \quad [A.5.7]$$

Suponiendo que la velocidad del fluido es en toda la longitud de los tubos la misma, y multiplicando y dividiendo el primer término por la sección de los tubos se obtiene:

$$u \cdot S \cdot \frac{\partial C_A}{\partial (z \cdot S)} = (-r_A)' \cdot \rho_L \cdot (1 - \varepsilon_L) \quad [A.5.8]$$

En el reactor existe un aumento de volumen al ser la relación cinética de mol entre productos y reactivos 2/1,5, pero debido a que la mayor parte del volumen está ocupado por un inerte (el nitrógeno), el incremento en número de moles es aproximadamente de un 3% en total con respecto al número de moles. Al ser este aumento tan pequeño se despreciará en lo sucesivo (además, al sobredimensionar el reactor se paliarán con creces los posibles efectos de este pequeño aumento de volumen).

Debido a esto se puede expresar  $dC_A$  como:

$$dC_A = C_{A0} \cdot dx_A \quad [A.5.9]$$

Sustituyendo en la **Ecuación A.5.8** y conociendo que el término  $u \cdot S$  es el caudal del fluido y el término  $z \cdot S$  es el volumen del reactor, se obtiene:

$$\rho_L \cdot dV = \frac{Q \cdot C_{A0} \cdot dx_A}{(-r_A)' \cdot (1 - \varepsilon_L)} \quad [A.5.10]$$

Sustituyendo  $Q \cdot C_{A0}$  por  $F_{A0}$  (caudal molar de entrada del reactivo limitante A) y  $\rho_L \cdot V$  por  $W$  (masa de catalizador) se obtiene:

$$dW = \frac{F_{A0} \cdot dx_A}{(-r_A)' \cdot (1 - \varepsilon_L)} \quad [A.5.11]$$

Siendo ésta la ecuación simplificada del balance de materia que se va a emplear en el diseño del reactor.



### 5.1.2. Balance de energía

Como se expuso en el **Apartado 1.1.** de los anexos del presente proyecto, en la ecuación de balance de energía general no se usará el término de acumulación, y en el reactor sí se deberán usar los términos referentes a generación y consumo. Por tanto la ecuación simplificada será:

$$(E) + (G) = (S) + (C) \quad [A.5.12]$$

Siendo (E) el cómputo de las entradas al reactor, (G) la generación, (S) las salidas y (C) el consumo. Al ser nuestra reacción exotérmica, el término de consumo no existirá, por lo que el término de consumo se eliminará, quedando:

$$(E) + (G) = (S) \quad [A.5.13]$$

La reacción que ocurre en el reactor se va a llevar a cabo en condiciones isotérmicas (se va a usar esta aproximación debido a en los reactores multitubulares el intercambio de calor es alto a causa del gran área de intercambio de calor), por lo que el fluido de entrada y el de salida van a poseer la misma entalpía. Debido a ello las únicas entalpías que intervienen en el proceso son las entalpías de entrada y salida de la refrigeración y la entalpía de reacción.

El término de entrada será igual a la entalpía de entrada del refrigerante, y la salida será igual a la entalpía de salida del refrigerante. Por tanto la ecuación quedará:

$$\Delta H_{refrigerante} = \frac{(-\Delta H_R) \cdot F_{Ao}}{(-v_A)} \cdot (x_A - x_{Ao}) \quad [A.5.14]$$

Siendo  $F_{Ao}$  el caudal molar de entrada del reactivo limitante A,  $x_A$  y  $x_{Ao}$  las conversiones de ese reactivo en cualquier punto del reactor y a la entrada del reactor respectivamente,  $(-v_A)$  es el coeficiente estequiométrico del reactivo A,  $(-\Delta H_R)$  es la entalpía de reacción, y  $\Delta H_{refrigerante}$  es la diferencia de entalpía del refrigerante.

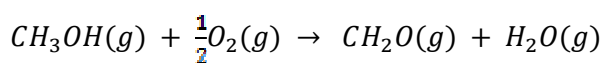
Mediante esta ecuación, posteriormente se expondrán los valores que poseen todas los términos anteriormente citados, se podrá calcular la cantidad de refrigerante necesario para que el reactor opere en condiciones isotérmicas.

## 5.2. Cinética

En este apartado se expondrán la estequiometría de la reacción, la cinética que sigue el proceso y las transformaciones que se ha hecho a esta ecuación para poder ser empleada.

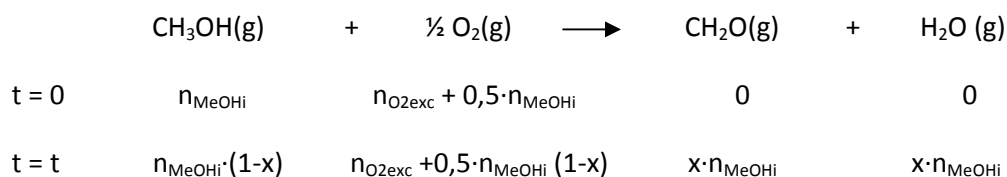
### 5.2.1. Estequiometría de la reacción

La reacción que ocurre en el reactor es:



Es una reacción irreversible, siendo el metanol el reactivo limitante y estando el oxígeno en exceso. Se suele emplear una proporción de oxígeno 3/1 en la alimentación (es decir, 3 moles de oxígeno por mol de metanol). Esto se traduce en un exceso de oxígeno de 2,5 veces la

cantidad necesaria de oxígeno para la conversión completa del metanol en la alimentación. A continuación se realiza el balance macroscópico al reactor a tiempo 0 y tiempo t:



Siendo x la conversión del reactivo limitante, que es el metanol, y  $n_{\text{O}_2\text{exc}}$  es 2,5 veces  $n_{\text{MeOH}i}$ .

Estas expresiones se pueden convertir a presiones considerando que se cumple la Ley de Raoult ( $P_A = y_A \cdot P_{\text{Total}}$ ) y que no existe expansión de volumen (la Ley de Raoult establece que las presiones parciales se comportan como la cantidad de materia de una corriente gaseosa si no existe expansión ni compresión en el volumen y los gases se comportan de manera ideal). Se expone un ejemplo:

Por la Ley de Raoult:

$$P_{\text{MeOH}} = y_m \cdot P_{\text{total}} \quad \text{siendo} \quad y_m = \frac{n_{\text{MeOH}i} \cdot (1-x)}{n_{\text{totales}}}$$

Sustituyendo:

$$P_{\text{MeOH}} = \left( \frac{n_{\text{MeOH}i} \cdot (1-x)}{n_{\text{totales}}} \right) \cdot P_{\text{total}}$$

También, por la Ley de Raoult, la presión parcial inicial de metanol es:

$$P_{\text{MeOH}i} = \left( \frac{n_{\text{MeOH}i}}{n_{\text{totales}}} \right) \cdot P_{\text{total}}$$

Como este término se encuentra en la expresión de la presión parcial de metanol se sustituye:

$$P_{\text{MeOH}} = (1-x) \cdot P_{\text{MeOH}i}$$

Expresión que es idéntica a la de cantidad de materia pero referida a presiones. Con el resto de compuestos se realiza el mismo procedimiento y se obtiene:

$$P_m = P_{\text{MeOH}i} \cdot (1-x) \quad [\text{A.5.15}]$$

$$P_{\text{O}_2} = 2,5 \cdot P_{\text{MeOH}i} + 0,5 \cdot P_{\text{MeOH}i} \cdot (1-x) = 3 \cdot P_{\text{MeOH}i} - 0,5 \cdot x \cdot P_{\text{MeOH}i} \quad [\text{A.5.16}]$$

$$P_{\text{form}} = x \cdot P_{\text{MeOH}i} \quad [\text{A.5.17}]$$

$$P_w = x \cdot P_{\text{MeOH}i} \quad [\text{A.5.18}]$$

Siendo  $P_m$  la presión parcial de metanol,  $P_{\text{O}_2}$  la presión parcial de oxígeno,  $P_{\text{form}}$  la presión parcial de formaldehído y  $P_w$  la presión parcial de agua. Todas estas expresiones se introducirán a continuación en la ecuación cinética para permitir su cálculo.

### 5.2.2. Ecuación cinética

La ecuación cinética que se va a usar para el diseño del reactor se ha encontrado en el Artículo de R. Tesser, M. Di Serio, E. Santacesaria, cuya expresión es:

$$r_c = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot P_m^a \cdot P_{O_2}^b}{k_1 \cdot P_m^a + k_2 \cdot P_{O_2}^b} \cdot \left( \frac{1}{1 + b_w \cdot P_w} \right) \quad [A. 5.19]$$

Siendo  $r_c$  la velocidad de reacción (expresada en las unidades de  $\text{kmol/h} \cdot \text{kg}_{\text{cat}}$ ),  $P_m$  la presión parcial de metanol (medida en atm),  $P_{O_2}$  la presión parcial del oxígeno (atm) y  $P_w$  la presión parcial del agua (atm).  $k_1$ ,  $k_2$  y  $b_w$  son constantes cinéticas que se calculan siguiendo las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} k_1 &= \exp(-18,4586 + 64790/RT) \\ k_2 &= \exp(-15,2687 + 57266/RT) \\ b_w &= \exp(+21,2814 - 111600/RT) \end{aligned} \quad [A. 5.20]$$

Siendo  $T$  la temperatura (medida en K) y  $R$  la constante de los gases ideales (medida en  $\text{J/mol} \cdot \text{K}$ ).  $b_w$  tiene unidades de  $\text{atm}^{-1}$ ,  $k_1$  está expresada en  $\text{kmol/h} \cdot \text{atm} \cdot \text{kg}_{\text{cat}}$  y  $k_2$  tiene unidades de  $\text{kmol/h} \cdot \text{atm}^{0,5} \cdot \text{kg}_{\text{cat}}$ .

$a$  y  $b$  son dos exponentes que se obtienen mediante ajustes experimentales (es decir, se calculan estos exponentes para que los datos reales se acerquen lo más posible a los datos que da el modelo). Una buena aproximación para estos valores es  $a=1$  y  $b=0,5$ .

Mediante la sustitución de las presiones parciales por las expresiones que se expusieron en el **Apartado 5.2.1.** del presente anexo, y de los valores de los exponentes  $a$  y  $b$ , se obtiene:

$$r_c = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot (1-x) \cdot P_{MeOH} \cdot (3 \cdot P_{MeOH} - 0,5 \cdot x \cdot P_{MeOH})^{0,5}}{k_1 \cdot (1-x) \cdot P_{MeOH} + k_2 \cdot (3 \cdot P_{MeOH} - 0,5 \cdot x \cdot P_{MeOH})^{0,5}} \cdot \frac{1}{(1 + b_w \cdot x \cdot P_{MeOH})} \quad [A.5.21]$$

Posteriormente, con la Ecuación A.5.21 se realizarán los cálculos para la obtención de la masa de catalizador y el volumen del reactor.

### 5.3. Características de la corriente de entrada

El fluido de alimentación posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{\text{ent}}$ ): 570 K
- ✓ Temperatura de salida ( $T_{\text{sal}}$ ): 570 K
- ✓ Temperatura media ( $T_{\text{med}}$ ): 570 K
- ✓ Viscosidad media ( $\mu$ ):  $2,703 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

- ✓ Densidad media ( $\rho$ ): 0,877 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Presión de entrada (P): 1,25 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{\text{molar}}$ ): 151,595 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 4,317 kg/s

Las propiedades tomadas anteriormente (excepto las temperaturas, presión y caudales) se han tomado como la media ponderada de las propiedades de cada compuesto. Las propiedades de cada compuesto se han realizado como la media aritmética de las propiedades de tal compuesto a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida.

#### 5.4. Características del reactor

El reactor será de tipo multitubular estando el catalizador en los tubos y circulando el refrigerante por la carcasa. Poseerá las siguientes características

- Será un reactor con un paso por carcasa.
- Los tubos estarán contruidos con Acero Carpenter 20 Mo-6 (es similar a la aleación Incoloy) debido a ser resistente a las atmósferas de formaldehído.
- La carcasa, al no estar en contacto con formaldehído, se construirá de Acero SA-240 (AISI 316L).
- El diámetro exterior de los tubos será de 1 de pulgada (1 in) y el diámetro interno será de 0,81 pulgadas (posteriormente se comprobará este diámetro).
- Los tubos estarán en configuración cuadrada con un pitch (o separación entre tubos) de 1,25 pulgada (1,25 in).
- Nuestra conversión final en el reactor será de 0,98.
- Supondremos que no existen reacciones indeseadas.
- El reactor opera isotérmicamente a una temperatura de 570 K.

El catalizador posee como propiedades:

- $D_p = 3 \cdot 10^{-3}$  m
- $\rho_p = 1666,67$  kg/m<sup>3</sup>

#### 5.5. Obtención de la masa de catalizador

Para la obtención de la masa de catalizador se usará la **Ecuación A.5.11** del presente anexo. Esta ecuación está en forma de derivadas, por lo que integraran ambos términos y se obtiene:

$$W = \frac{F_{A0}}{(1-\varepsilon_L)} \cdot \int_0^x \frac{dx}{(-r_C)'} \quad [\text{A.5.22}]$$

Debido a que la conversión va aumentando conforme el fluido va pasando por el reactor y al ser la ecuación que rige este proceso (la **Ecuación A.5.21**) demasiado compleja para su integración, se realizará una integral gráfica.

El proceso será el siguiente:

- Se calcularán las constantes  $b_w$ ,  $k_1$  y  $k_2$ , las cuales se van a mantener constantes durante todo el proceso.
- Se supondrán conversiones de metanol a lo largo del reactor y se calculará la velocidad de reacción en ese punto, hasta llegar a una conversión igual a 0,98.
- Se calculará la inversa de la reacción de velocidad, y se calcularán la inversa de la velocidad media entre el punto anterior y el considerado y la diferencia entre la conversión en el punto considerado y el anterior.
- Ambos valores (el de la inversa de la velocidad de reacción media y el paso entre conversiones) se multiplicarán, y simultáneamente estos valores se irán sumando hasta obtener un valor final.

El primer paso es calcular las constantes, y el resultado de éstas es:

$$k_1 = e^{(-18,4586+64790/8,314 \cdot 570K)} = 8,34 \cdot 10^{-3} \text{ kmol/atm} \cdot \text{h} \cdot g_{cat}$$

$$k_2 = e^{(-15,2687+57266/8,314 \cdot 570K)} = 4,14 \cdot 10^{-2} \text{ kmol/atm} \cdot \text{h} \cdot g_{cat}$$

$$b_w = e^{(21,2814+111600/(8,314 \cdot 570K))} = 0,104 \text{ atm}^{-1}$$

El resto del procedimiento se puede contemplar en la siguiente tabla:

**Tabla A.5.1.**  
Cálculo de la velocidad de reacción y la masa de catalizador

x	$r_c$ (kmol/h·g <sub>cat</sub> )	$1/r_c$ (h·g <sub>cat</sub> /kmol)	$\Delta x$	$1/r_{c \text{ media}}$	$\sum 1/r_{c \text{ media}} \cdot \Delta x$
0,0	6,46E-04	1547,16	0,00	0,000	0,000
0,1	5,75E-04	1739,50	0,10	1643,330	164,333
0,2	5,05E-04	1981,21	0,10	1860,354	350,368
0,3	4,36E-04	2293,55	0,10	2137,379	564,106
0,4	3,69E-04	2711,96	0,10	2502,754	814,382
0,5	3,03E-04	3300,25	0,10	3006,103	1114,992
0,6	2,39E-04	4186,04	0,10	3743,143	1489,306
0,7	1,76E-04	5667,15	0,10	4926,592	1981,965
0,8	1,16E-04	8637,04	0,10	7152,095	2697,175
0,9	5,69E-05	17563,19	0,10	13100,116	4007,186
0,98	1,12E-05	89035,37	0,08	53299,276	8271,129

Ya obtenido el valor de la integral solo falta saber la porosidad del lecho y el caudal molar inicial de metanol. Al ser las partículas de catalizador esféricas, la porosidad del lecho es 0,4, y el caudal molar de entrada de metanol es de 9,71 mol/s. Sustituyendo ambos valores y pasando los gramos a kilogramos se obtiene:

$$W = \frac{\frac{9,71 \text{ mol}}{\text{s}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ kmol}}{1000 \text{ mol}}}{(1 - 0,4)} \cdot 8271,129 \text{ g}_{\text{cat}} \cdot \text{h} / \text{kmol} = 481,876 \text{ kg}_{\text{cat}}$$

Por tanto se necesitan 481,876 kg de catalizador, pero para evitar posibles pérdidas de actividad o defectos del catalizador, se usarán 500 kg de catalizador.

Se calcula el volumen del reactor mediante la siguiente ecuación:

$$W = \rho_l \cdot V = \rho_p \cdot (1 - \varepsilon_L) \cdot V \quad [\text{A.5.23}]$$

Siendo  $\rho_p$  la densidad de las partículas de catalizador. Sustituyendo los valores:

$$V = \frac{500 \text{ kg}}{(1 - 0,4) \cdot 1666,67 \text{ kg/m}^3} = 0,500 \text{ m}^3$$

## 5.6. Diseño mecánico de los tubos

Para la determinación del número de tubos y su longitud se deberá suponer un número de tubos y un diámetro externo de éstos, y después comprobar si la suposición de esas características de los tubos es válida. Para que el número de tubos y el diámetro exterior de los tubos sean válidos se deben cumplir las siguientes consideraciones:

- La longitud de tubos que se obtenga debe ser adecuada (ni muy grande ni muy pequeña).
- La velocidad del fluido por dentro de los tubos debe encontrarse en el rango habitual de velocidades de fluidos a las condiciones de operación.
- La pérdida de carga en tubos no debe sobrepasar 1 atm.

Por ello se va a suponer un número de tubos igual a 600 y un diámetro exterior de tubo (como se comentó en el **Apartado 5.4.** del presente anexo) de 1 in.

Ahora se procede a comprobar las dos primeras suposiciones del número de tubos (la tercera comprobación, la de la pérdida de carga, se expondrá en el **Apartado 5.9.1.** del presente Anexo).

La longitud de los tubos se obtiene mediante la expresión del volumen del reactor:

$$V = \pi \cdot D_i^2 \cdot L \cdot N / 4 \quad [\text{A.5.24}]$$

Siendo  $D_i$  el diámetro interno de los tubos,  $L$  la longitud de éstos,  $N$  el número de tubos y  $V$  el volumen del reactor. Para obtener el diámetro interno de los tubos se debe realizar el diseño mecánico de los tubos. Para determinar el diámetro interno se calcula el espesor de los tubos debido a la presión interna mediante código ASME B.31.3. La ecuación es la que sigue:

$$t = \left( \frac{P_D \cdot D_0}{2 \cdot (S \cdot E + P_D \cdot Y)} + C \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - M/100} \right) \quad [A.5.25]$$

Siendo:

E: eficiencia de soldadura

S: tensión máxima permisible

Y: coeficiente dependiente de la temperatura de operación y del material de los tubos

P<sub>D</sub>: presión de diseño

D<sub>0</sub>: diámetro externo de los tubos

M: margen de tolerancia de fabricación

C: margen por corrosión

Se determina a continuación cada uno de esos parámetros:

- Eficiencia de soldadura (E):  
Este término se refiere a la disminución de la resistencia del material de los tubos debido a que las uniones soldadas no son tan resistentes como el resto del material. Se observa en la tabla UW-12 del Código ASME VIII-Div.1 que E toma el valor de 1 para una junta a tope a doble cordón u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado por el interior y el exterior de los tubos.
- Tensión máxima admisible (S):  
Según se puede observar en la **Tabla A.13.10**, la tensión máxima admisible para acero Carpenter 20 Mo-6 es de 31000 psi para temperaturas que rondan los 600K (se escoge una temperatura inmediatamente superior a la temperatura máxima de los fluidos).
- Factor Y:  
Como se puede observar en la **Tabla A.13.13**, para Acero Carpenter 20 Mo-6 (otros metales dúctiles) a temperaturas inferiores a 900 °F el valor del término Y es 0,4.
- Presión de diseño (P<sub>D</sub>):  
La presión de diseño se calcula como la presión a la que se opera aumentada un 10%:

$$P_D = 1,1 \cdot 1,25 atm = 1,375 atm = 19,9375 psi$$

- Diámetro exterior de los tubos (D<sub>0</sub>):  
El diámetro exterior de los tubos es 1 in.
- Margen de tolerancia a la fabricación (M):  
Las tuberías sin costura poseen un valor alto de tolerancia a la fabricación, en el caso en estudio este margen es de un 12,5%.
- Margen de corrosión (C):  
El Código ASME VII-Div.1 se debe tener en cuenta para diseñar las unidades de proceso que puedan estar sometidas a corrosión, erosión o abrasión mecánica un margen de

corrosión, el cual predice el desgaste del espesor y así la vida útil del equipo sea la correcta. Para ello los cálculos pertinentes se deben de llevar a cabo en condiciones corroídas para garantizar la validez de estos cálculos.

Se considera un desgaste de corrosión para tuberías y depósitos de 5 milésimas de pulgada por año. Para los equipos principales (como es el caso) se usan vidas útiles de 15-20 años, usando aquí el valor de 15 años como vida útil del presente reactor. Se calcula a continuación el valor de C:

$$C = 15 \text{ años} \cdot 0,005 \text{ in/año} = 0,075 \text{ in} = 0,1905 \text{ cm}$$

Se puede ya el espesor de los tubos mediante la Ecuación **A.5.25**:

$$t = \left( \frac{19,9375 \text{ psi} \cdot 1 \text{ in}}{2 \cdot (31000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,9375 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,0861 \text{ in}$$

Se obtiene mediante la **Tabla A.13.6.** el espesor normalizado de 0,095 in que es el inmediatamente superior al espesor obtenido. Por lo tanto, los tubos serán 13 BWG (espesor 0,095 in, diámetro interior 0,81 in (0,02057 m)). Por lo tanto el diámetro interior coincide con el supuesto en el **Apartado 5.4.** del presente Anexo.

Ya obtenido el diámetro interno se procede a calcular la longitud de los tubos mediante la **Ecuación A.5.24**:

$$L = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D_i^2 \cdot N} = \frac{4 \cdot 0,500 \text{ m}^3}{\pi \cdot (0,02057 \text{ m})^2 \cdot 600} = 2,51 \text{ m} = 8,235 \text{ ft}$$

Se escoge una longitud de tubos normalizada de 10 ft (3,048 m), que es ligeramente superior a la obtenida. Debido a que esta longitud no es muy elevada es válida la suposición de 600 tubos según este criterio.

Se comprueba el segundo criterio, para ello se debe calcular la velocidad de paso del fluido por los tubos:

$$u_z = \frac{Q_v}{S \cdot N} \quad [\text{A.5.26}]$$

Siendo  $Q_v$  el caudal volumétrico del fluido, N el número de tubos y S la sección de los tubos. El caudal volumétrico de fluido se puede obtener mediante la Ley de los Gases Ideales:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad [\text{A.5.27}]$$

Dividiendo por el tiempo:

$$P \cdot Q_v = F \cdot R \cdot T \quad [\text{A.5.28}]$$

Siendo F el caudal molar de fluido, T la temperatura, P la presión y R la constante de los gases ideales. Primero se obtiene el caudal molar de la corriente como la media del caudal molar de la entrada y la salida:



$$F = \frac{151,595 \text{ mol/s} + 156,35 \text{ mol/s}}{2} = 153,97 \text{ mol/s}$$

Sustituyendo se obtiene:

$$Q_v = \frac{0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 570 \text{ K} \cdot 153,97 \text{ mol/s}}{1,25 \text{ atm}} = 5757,25 \text{ L/s} = 5,76 \text{ m}^3/\text{s}$$

La sección de un cilindro es el área de la base:

$$S = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \quad [\text{A.5.29}]$$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$u_z = \frac{4 \cdot 5,76 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot (0,02057 \text{ m})^2 \cdot 600} = 28,87 \text{ m/s}$$

Si se pasa a ft/s se obtiene un valor de velocidad de 94,73 ft/s. Si se observa la **Tabla A.13.11.** se puede ver que para gases sobrecalentados entre presiones de 0 y 10 psig la velocidad de paso del fluido se encuentra entre 50-140 ft/s, estando el valor que se ha obtenido (94,73 ft/s) en este rango de velocidad, por lo que según este criterio el número de tubos también es válido.

En este momento se puede calcular si la suposición de que la dispersión axial es despreciable (véase **Apartado 5.1.1.** del presente anexo).

$$L_{lecho}/d_p = 3,048 \text{ m} / 3 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1016$$

Como este valor es mucho mayor a 50, es correcta la suposición de que la dispersión axial es despreciable.

## 5.7. Diseño mecánico de la carcasa

Para determinar el diámetro de la carcasa se usará la ecuación desarrollada por Kern (Coulson & Richardson's, 1988)B:

$$D_{carcasa}(\text{mm}) = D_0 \cdot \left( \frac{N_{tubos}^0}{K_1} \right)^{\frac{1}{n_1}} + 90 \quad [\text{A.5.30}]$$

Donde  $K_1$  y  $n_1$  son constantes que para un número de pasos por carcasa igual a uno poseen los valores de 0,319 y 2,142 respectivamente. Sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene:

$$D_{carcasa}(\text{mm}) = 0,0254 \text{ m} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} \cdot \left( \frac{600}{0,319} \right)^{\frac{1}{2,142}} + 90 = 947,986 \text{ mm}$$

Este diámetro de carcasa se normaliza y se obtiene un diámetro estándar (inmediatamente superior al obtenido) de carcasa de 38 in (0,9652m).

Para la determinación del espesor de la carcasa se deben indicar con anterioridad una serie de datos:

- **Espesor mínimo de pared:**  
Se debe escoger un espesor mínimo de pared, así por la fórmula de aceros inoxidables del Código ASME VII-Div 1:

$$t_{min} = 2,5 + C = 2,5mm + 1,905 mm = 4,405 mm$$

Para aceros al carbono el Código ASME VII-Div 1 da la siguiente ecuación:

$$t_{min} = 5 + C = 5mm + 1,905 mm = 6,905 mm$$

Se escoge de ambos el mayor espesor (6,905 mm).

- **Presión y temperaturas de diseño ( $P_D$  y  $T_D$ ):**  
La presión de diseño se considera la presión de la carcasa más un 10%:

$$P_D = 1,1 \cdot 1,15 atm = 1,265 atm = 18,35 psi$$

Debido a que esta presión de diseño es menor a 30 psi, se escoge como presión de diseño 30 psi.

La temperatura de diseño se calcula:

$$T_D = T_{maxop} + 20^\circ C = (393 K - 273 K) + 20^\circ C = 140^\circ C = 284^\circ F$$

- **Tensión máxima admisible (S):**  
Según se puede observar en la **Tabla A.13.9.** la tensión máxima admisible para acero SA-240 es de 20000 psi para temperaturas que rondan los 300 °F (se escoge una temperatura inmediatamente superior a la temperatura de diseño).
- **Eficiencia de soldadura (E):**  
Se observa en la tabla UW-12 del código ASME VIII-Div.1 que E toma el valor de 0,85 para una junta a tope con doble cordón u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado, y siendo examinadas las juntas por zonas.

Antes de realizar ningún cálculo se deben conocer cuáles son las tensiones a las que se encuentra sometido el equipo en estudio.

**Tabla A.5.2.**

Tensiones que influyen en el equipo (Megyesy, E.F., 2001)

	Tensiones circunferenciales		Tensiones longitudinales	
Carga	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión
Peso				X
Viento			X	X
Seísmo			X	X
Presión interior	X		X	
Presión exterior				

Debido a que la tensión debida a seísmos es despreciable frente a la ejercida por la presión interior y a las tensiones por viento, esta tensión no se tendrá en cuenta en los cálculos, aunque al escoger el espesor normalizado de la carcasa se tendrá un sobredimensionamiento del espesor que cubrirá la tensión despreciada.

Según el Código ASME VII-Div. 1 existen dos tensiones diferentes en cuanto al cálculo del espesor debido a la presión interior: las tensiones circunferenciales y las tensiones longitudinales.

- Tensiones circunferenciales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{circ} = \frac{P_D \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_D} \quad [A.5.31]$$

Siendo:

E: eficiencia de soldadura  
S: tensión máxima permisible (psi)  
R: radio de la carcasa (in)  
P<sub>D</sub>: presión de diseño (psi)

Sustituyendo:

$$t_{circ} = \frac{30psi \cdot 19 in}{20000psi \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 30psi} = 0,034in = 0,853mm$$

- Tensiones longitudinales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{long} = \frac{P_D \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_D} \quad [A.5.32]$$

Sustituyendo:

$$t_{long} = \frac{30psi \cdot 19 in}{2 \cdot 20000psi \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 30psi} = 0,017in = 0,426mm$$

A continuación se calcula el espesor debido a la carga por viento:

Para determinar las cargas por viento se escogen las condiciones de viento más desfavorables, encontrándose que en la zona donde se situará la planta la velocidad máxima de viento son 180 km/h. Primeramente se calculará la carga por viento, necesitando con anterioridad la presión debida por la carga por viento:

$$P_w = q_s \cdot C_e \cdot C_q \quad [A.5.33]$$

Donde  $P_w$  es la presión por carga por viento medida en  $lb/ft^2$ ,  $q_s$  es la presión de estancamiento por viento a la altura estándar de 30 pies (medida en  $lb/ft^2$ ),  $C_e$  es el coeficiente de la altura combinada y  $C_q$  es un coeficiente denominado factor de forma. Todos estos coeficientes se obtienen de tablas.

$C_q$  para sección circular o elíptica vale 0,8 (este valor se puede observar en de la **Tabla A.13.17.**).  $q_s$  vale 32,44  $lb/ft^2$  para velocidades de viento de 180 km/h (112,44 mph) (véase la **Tabla A.13.15.**). La planta en estudio es una planta mediana, por lo que se usará una exposición a viento tipo B, y para este tipo de exposición y para alturas entre 0 y 20 pies (la altura total del recipiente se calculará a continuación y vale 18,92 ft) el valor de  $C_e$  es 0,7 (véase **Tabla A.13.16.**). Sustituyendo en la **Ecuación A.5.33**:

$$P_w = 32,44 \text{ lb/ft}^2 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 18,17 \text{ lb/ft}^2$$

La expresión para calcular el momento creado por el viento es:

$$M_T = M - h_T \cdot (V - 0,5 \cdot P_w \cdot D_o \cdot h_T) \quad [A.5.34]$$

Siendo  $M_T$  el momento debido a la altura (medido en  $ft \cdot lb$ ),  $M$  es el momento máximo (expresado en  $ft \cdot lb$ ),  $h_T$  es la distancia entre el suelo y la terminación del faldón (medido en ft),  $V$  es la fuerza cortante total (expresada en lb),  $D_o$  es el diámetro exterior del recipiente considerando el espesor del aislante (expresado en ft), y  $P_w$  es la presión debida a la carga por viento (medida en  $lb/ft^2$ ).  $M$  y  $V$  se obtienen de las expresiones:

$$M = P_w \cdot D_o \cdot H \cdot h_1 \quad [A.5.35]$$

$$V = P_w \cdot D_o \cdot H \quad [A.5.36]$$

$$h_1 = H/2 \quad [A.5.37]$$

Siendo  $H$  la altura total del equipo y  $h_1$  la longitud del brazo de palanca, ambas expresadas en ft. Se han escogido unos cabezales de 0,82 ft y el faldón mide 3,28 ft.  $h_T$  es equivalente a la altura del faldón, por lo tanto  $h_T = 3,28$  ft.  $H$  se calcula como la suma de los cabezales, el faldón y la longitud de los tubos:

$$H = 3,28 + 2 \cdot 0,82 + 14 = 18,92 \text{ ft}$$

A partir de aquí se calcula el valor de  $h_1 = 9,46$  ft. El valor de  $D_o$  se obtiene suponiendo un valor de espesor de aislante de 1,969 in (este valor se comprobará en el **Apartado 5.10.** del presente anexo) y que el espesor de la carcasa es igual a 0,3 in (este valor de espesor se comprobará a continuación en el presente apartado). Así se obtiene:

$$D_0 = 2 \cdot 1,969 \text{ in} + 2 \cdot 0,3 \text{ in} + 38 \text{ in} = 42,54 \text{ in} = 3,54 \text{ ft}$$

Se sustituye en las **Ecuaciones A.5.35, A.5.36 y A.5.34**:

$$M = 18,17 \text{ lb/ft}^2 \cdot 3,54 \text{ ft} \cdot 18,92 \text{ ft} \cdot 9,46 \text{ ft} = 11525,96 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

$$V = 18,17 \text{ lb/ft}^2 \cdot 3,54 \text{ ft} \cdot 18,92 \text{ ft} = 1218,39 \text{ lb}$$

$$M_T = 11525,96 \text{ lb} \cdot \text{ft} - 3,28 \text{ ft} \cdot (1218,39 \text{ lb} - 0,5 \cdot 18,17 \text{ lb/ft}^2 \cdot 3,54 \text{ ft} \cdot 3,28 \text{ ft}) = 7876,05 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

Habiendo calculado  $M_T$  ya se puede calcular el espesor de carcasa necesario debido a la carga por viento:

$$t_v = \frac{12 \cdot M_T}{R^2 \cdot S \cdot E \cdot \pi} \quad [\text{A.5.38}]$$

Siendo  $t_v$  el espesor debido a la carga por viento (expresado en in), R el radio del equipo considerando el aislante (medido en in), S la tensión máxima del material (medida en psi), E es la eficiencia de la soldadura y  $M_T$  es el momento debido a la carga por viento (expresado en lb·ft). Sustituyendo los valores se obtiene:

$$t_v = \frac{12 \cdot 7876,05 \text{ lb} \cdot \text{ft}}{\left(\frac{42,54}{2} \text{ in}\right)^2 \cdot 20000 \text{ psi} \cdot 0,85 \cdot \pi} = 3,91 \cdot 10^{-3} \text{ in} = 0,099 \text{ mm}$$

Se escoge el mayor espesor entre los obtenidos anteriormente, es decir,  $t = 0,034 \text{ in}$ . A este valor se le suma el desgaste por corrosión:

$$t = 0,034 \text{ in} + 0,075 \text{ in} = 0,109 \text{ in} = 2,769 \text{ mm}$$

Como este valor de espesor es menor al espesor mínimo, se usará el valor del espesor mínimo (6,905 mm o 0,272 in). Se normaliza este valor de espesor y se obtiene:

$$t = 0,3 \text{ in} = 0,762 \text{ cm} = 0,00762 \text{ m}$$

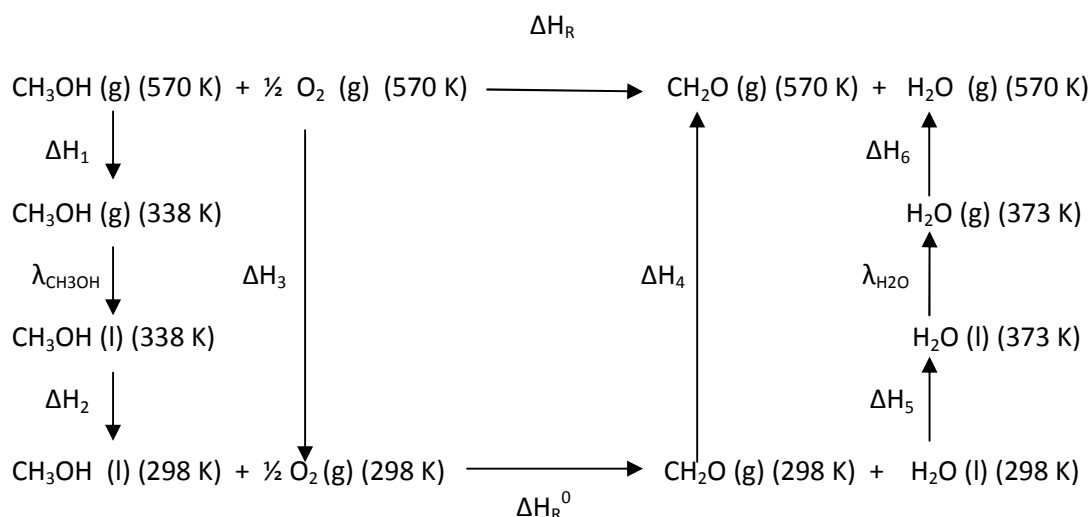
Como se puede observar, este espesor de carcasa es el que supusimos anteriormente, por lo que la anterior consideración fue válida.

## 5.8. Refrigeración

En este apartado se calculará el caudal necesario de agua para la refrigeración de los tubos. Para ello primeramente se usa la expresión del balance de energía obtenida en el **Apartado 5.1.2.** del presente Anexo para calcular el calor intercambiado:

$$Q = \frac{(-\Delta H_R) \cdot F_{Ao}}{(-v_A)} \cdot (x_A - x_{Ao}) \quad [\text{A.5.39}]$$

Debido a que la temperatura a la que opera el reactor no es la estándar (298 K), se debe calcular la entalpía de reacción a la temperatura de operación (570 K), para ello se realiza el siguiente balance termodinámico:



Para determinar la entalpía de reacción a 570 K se deberán calcular todas las entalpías que intervienen en el proceso. Para ello se usan las ecuaciones de las  $c_p$  de los compuestos y las entalpías de vaporización de todas las sustancias que se encuentran en el Anexo 2 del presente proyecto. Para calcular las entalpías de cambio de temperatura por mol se usa la ecuación:

$$\Delta H = c_p \cdot \Delta T \quad [\text{A.5.40}]$$

Se calculan las entalpías y las entalpías de vaporización y se obtienen los siguientes valores:

**Tabla A.5.3.**  
Entalpías que intervienen en el balance termodinámico

Entalpía	Valor (kJ/mol)
$\Delta H_1$	-15,25
$\lambda_{\text{MeOH}}$	-35,20
$\Delta H_2$	-1,46
$\Delta H_3$	-8,29
$\Delta H_4$	11,11
$\Delta H_5$	2,54
$\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$	44,08
$\Delta H_6$	6,85

Para obtener la entalpía de reacción a 570 K se deberá usar la siguiente ecuación:

$$\Delta H_R = \Delta H_1 + \lambda_{\text{MeOH}} + \Delta H_2 + \Delta H_3/2 + \Delta H_4 + \Delta H_5 + \lambda_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta H_6 + \Delta H_R^0 \quad [\text{A.5.41}]$$

Sustituyendo se obtiene:

$$\Delta H_R = -15,25 - 35,20 - 1,46 - 8,29/2 + 11,11 + 2,54 + 44,08 + 6,85 - 158,8$$

$$\Delta H_R = -150,28 \text{ kJ/mol}$$

Ya obtenida la entalpía de reacción se puede sustituir ésta en la **Ecuación A.5.39**:

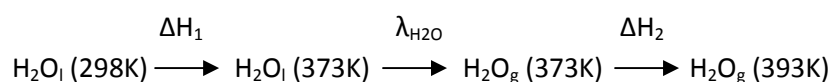
$$Q = \frac{-\left(-150,28 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) \cdot 9,71 \text{ mol/s}}{1} \cdot 0,98 = -1430,00 \text{ kJ/s}$$

El refrigerante posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{\text{ent}}$ ): 298 K
- ✓ Temperatura de salida ( $T_{\text{sal}}$ ): 393 K
- ✓ Temperatura media ( $T_{\text{med}}$ ): 345,5 K
- ✓ Viscosidad media ( $\mu$ ):  $4,35 \cdot 10^{-4}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ): 995,657 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Presión de entrada (P): 1,15 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{\text{molar}}$ ): 165,556 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 2,98 kg/s

Las propiedades se han obtenido como la media aritmética entre las propiedades de la entrada y la salida. El caudal molar y el caudal másico del refrigerante se obtendrán a continuación.

El fluido refrigerante, que es agua pura, pasará de una temperatura de 298 K, temperatura a la cual es un líquido, a 393 K, temperatura a la cual es un gas, por lo que se producirá un cambio de fase durante el proceso. El balance termodinámico del fluido refrigerante es el siguiente:



Se obtienen las entalpías de cambio de temperatura mediante la Ecuación A.5.40. (las ecuaciones de las  $c_p$  se encuentran en el **Anexo 2** del presente proyecto), y la entalpía de vaporización del agua es 44,082 kJ/mol. Conociendo esto se obtiene:

**Tabla A.5.4.**

Entalpías que intervienen en el balance termodinámico

Entalpía	Valor (kJ/kg)
$\Delta H_1$	74,25
$\lambda_{\text{MeOH}}$	386,6
$\Delta H_2$	19,4

Por tanto la diferencia de entalpía que sufre el refrigerante es:

$$\Delta H_{\text{refri}} = \Delta H_1 + \lambda_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta H_2 = 480,25 \text{ kJ/kg}$$

Mediante el balance de energía al reactor (véase el **Apartado A.5.2.** del presente Anexo) se obtenía:

$$Q = W_{refri} \cdot \Delta H_{refri} \quad [A.5.42]$$

Sustituyendo se obtiene:

$$W_{refri} = \frac{1430 \text{ kJ/s}}{480,25 \text{ kJ/kg}} = 2,98 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 165,556 \text{ mol/s}$$

Ahora se determina la presión a la que el caudal de refrigerante sale de la carcasa. Para ello se usará la siguiente expresión:

$$P_v = e^{\left(C_1 + \frac{C_2}{T} + C_3 \cdot \ln(T) + C_4 \cdot T^{C_5}\right)} \quad [A.5.43]$$

Siendo  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  y  $C_5$  constantes dependientes del compuesto. Para el agua estas constantes tienen los valores de:

**Tabla A.5.5.**

Valores de las constantes de la presión de vapor (Perry et Al. 2001)

Constante	Valor
$C_1$	73,649
$C_2$	-7258,2
$C_3$	-7,3037
$C_4$	$4,17 \cdot 10^{-6}$
$C_5$	2

Sustituyendo en la Ecuación A.5.43. se obtiene:

$$P_v = e^{\left(73,649 - \frac{7258,2}{393} - 7,3037 \cdot \ln(393) + 4,17 \cdot 10^{-6} \cdot 393^2\right)} = 197686,31 \text{ Pa} = 1,95 \text{ atm}$$

Por tanto el caudal de agua líquida de refrigeración será de 2,98 kg/s que entrará en el reactor a 298 K y a una presión de 1,15 atm, y saldrá del reactor en forma de vapor de agua a 393 K y 1,95 atm.

## 5.9. Pérdidas de carga

En este apartado se calcularán las pérdidas de carga tanto en tubos como en carcasa.

### 5.9.1. Pérdidas de carga en tubos

La pérdida de carga en tubos con relleno se calcula mediante la Ecuación de Ergun. La pérdida de carga debe ser adecuada (véase los requisitos del número de tubos que se encuentran en el **Apartado 5.6.** del presente anexo), y para calcularla se puede usar una modificación de la Ecuación de Ergun (Levenspiel, 2006) si la variación de la densidad es despreciable (en el



reactor la variación de la densidad es despreciable al ser la temperatura de salida la misma a la de la entrada y la pérdida de presión pequeña (esto se comprobará posteriormente):

$$\frac{P_L}{P_0} = 1 - \alpha_m \cdot \frac{W}{N_t} \quad [\text{A. 5.44}]$$

$$\alpha_m = \frac{\beta_m}{P_0} \quad [\text{A. 5.45}]$$

$$\beta_m = \frac{G}{\rho \cdot d_p \cdot A_c \cdot \rho_c \cdot \varepsilon_B^3} \cdot \left( \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_B) \cdot \mu}{d_p} + 1,75 \cdot G \right) \quad [\text{A.5.46}]$$

Siendo:

$\mu$ : viscosidad del fluido que circula por los tubos (Pa·s)

$\varepsilon_B$ : porosidad del lecho

$d_p$ : diámetro de partícula (m)

$\rho$ : densidad del fluido que circula por los tubos (kg/m<sup>3</sup>)

$G$ : velocidad másica (kg/m<sup>2</sup>·s)

$A_c$ : área longitudinal de los tubos (m<sup>2</sup>)

$P_0$ : presión de entrada del fluido que circula por los tubos (Pa)

$P_L$ : presión de salida del fluido que circula por los tubos (Pa)

$W$ : masa de catalizador (kg)

$N_t$ : número de tubos del reactor (Pa)

$\rho_c$ : densidad de la partícula (kg/m<sup>3</sup>)

Se calculan a continuación tanto el área longitudinal de los tubos como la velocidad másica:

$$G = \rho \cdot v = 0,876 \text{ kg/m}^3 \cdot 28,87 \text{ m/s} = 25,290 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$A_c = \pi \cdot D_i \cdot L \quad [\text{A.5.47}]$$

Siendo  $D_i$  el diámetro interno de los tubos y  $L$  la longitud de los tubos, y sustituyendo en la ecuación:

$$A_c = \pi \cdot 0,02057 \text{ m} \cdot 3,048 \text{ m} = 0,197 \text{ m}^2$$

Conociendo todos los valores se sustituye en las **Ecuaciones A.5.44, A.5.45 y A.5.46** y se obtiene:

$$\beta_m = 2,065 \cdot 10^4 \text{ kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}_{cat}$$

$$\alpha_m = \frac{2,065 \cdot 10^4 \text{ kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}_{cat}}{1,25 \text{ atm} \cdot 101325 \text{ Pa/atm}} = 0,163 \text{ kg}_{cat}^{-1}$$

$$P_L = \left( 1 - 0,163 \text{ kg}_{cat}^{-1} \cdot \frac{500 \text{ kg}_{cat}}{600} \right) \cdot 1,25 \text{ atm} = 1,080 \text{ atm}$$

Por lo que la presión de salida del fluido que va por los tubos es de 1,080 atm. Se calcula la pérdida de presión en los tubos:

$$\Delta P = 1,25 \text{ atm} - 1,080 \text{ atm} = 0,17 \text{ atm}$$

Se puede observar que esta pérdida de carga es mucho menor a 1 atm, por lo que la suposición del número de tubos que se encuentra en el **Apartado 5.6.** del presente Anexo es válida (cumple las tres condiciones que se le exigía).

### 5.9.2. Pérdidas de carga en carcasa

### 4.10.2. Pérdidas de carga en carcasa

Las pérdidas de carga en carcasa se obtienen mediante el método de CERN:

$$\Delta P = \frac{f_c \cdot G_c^2 \cdot (N_c + 1) \cdot D_c}{D_e \cdot \rho} \quad [\text{A.5.48}]$$

Siendo:

$f_c$ : factor de fricción en carcasa.

$G_c$ : velocidad másica en carcasa ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ).

$N_c$ : número de deflectores.

$D_c$ : diámetro de la carcasa (m)

$D_e$ : diámetro equivalente (m)

La velocidad másica en carcasa se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G_c = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot (D_c^2 - N_t \cdot D_0^2) \cdot X} \quad [\text{A.5.49}]$$

Siendo M el caudal másico del fluido que circula por la carcasa y X el cociente entre el pitch y el diámetro exterior de los tubos:

$$X = \frac{\text{pitch}}{D_0} = \frac{1,25 \text{ in}}{1 \text{ in}} = 1,25$$

Sustituyendo en la **Ecuación A.5.50**:

$$G_c = \frac{4 \cdot 2,89 \text{ kg/s}}{\pi \cdot ((0,9652 \text{ m})^2 - 600 \cdot (0,0254 \text{ m})^2) \cdot 1,25} = 5,41 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$$

El factor de fricción necesita del cálculo del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Así, el número de Reynolds:

$$Re = \frac{G_c \cdot D_c}{\mu} = \frac{5,41 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot 0,9652 \text{ m}}{4,35 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 1,20 \cdot 10^4$$

Conociendo que la rugosidad relativa para ese diámetro de carcasa y acero comerciales es de 0,0018, se obtiene del gráfico de Moody un valor de factor de fricción de 0,028.

El diámetro equivalente se define para el flujo de fluido a través de los tubos en vez de transversalmente a pesar de existir los deflectores. Para disposición cuadrada la determinación de este parámetro sigue la siguiente ecuación:

$$D_e = \frac{4 \cdot pitch^2}{\pi \cdot D_0} - D_0 \quad [A.5.50]$$

$$D_e = \frac{4 \cdot (0,03175m)^2}{\pi \cdot 0,0254m} - 0,0254m = 0,0251m$$

El número de deflectores se calcula mediante la ecuación:

$$N_c = \frac{L}{P_{def}} \quad [A.5.51]$$

Donde L es la longitud de los tubos y  $P_{def}$  es la distancia entre deflectores

En las normas T.E.M.A. existen un criterio para la determinación de la distancia mínima y máxima entre deflectores. Así la distancia mínima entre deflectores se define como la mayor de las distancias siguientes:

- 2 pulgadas (0,0508 m)
- 1/5 del diámetro de la carcasa (0,193 m)

En este caso se escoge el valor mayor, es decir, la distancia mínima entre deflectores será de 0,193 m.

La distancia máxima entre deflectores se determina mediante la siguiente tabla:

**Tabla A.5.6.**  
Normas T.E.M.A.: Separación máxima entre deflectores

Tube OD	Tube Materials and Temperature Limits °F (°C)	
	Carbon Steel & High Alloy Steel, 759 (399) Low Alloy Steel, 850 (454) Nickel-Copper, 600 (316) Nickel, 850 (464) Nickel-Chromium-Iron, 1000 (538)	Aluminum & Aluminum Alloys, Copper & Copper Alloys, Titanium Alloys At Code Maximum Allowable Temperature
1/4 (6.4)	26 (660)	22 (559)
3/8 (9.5)	35 (889)	30 (762)
1/2 (12.7)	44 (1118)	38 (965)
5/8 (15.9)	52 (1321)	45 (1143)
3/4 (19.1)	60 (1524)	52 (1321)
7/8 (22.2)	69 (1753)	60 (1524)
1 (25.4)	74 (1880)	64 (1626)
1-1/4 (31.8)	88 (2235)	76 (1930)
1-1/2 (38.1)	100 (2540)	87 (2210)
2 (50.8)	125 (3175)	110 (2794)

En el caso en estudio la aleación empleada es Acero Carpenter 20 Mo-6, que es una aleación de níquel, cromo y hierro (y otros compuestos en menor proporción), y el diámetro externo de los tubos es 1 pulgadas.

Así se obtiene una distancia máxima entre deflectores de 74 pulgadas (1,880 m).

Para obtener la distancia entre deflectores se va a realizar la media aritmética entre los valores mínimo y máximo de distancia entre deflectores:

$$P_{def} = \frac{0,193 \text{ m} + 1,880 \text{ m}}{2} = 1,03 \text{ m}$$

Se aproxima este valor obtenido a una distancia entre deflectores de 1 m.

Usando la **Ecuación A.5.52** se obtiene:

$$N_c = \frac{3,048 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 3,048$$

Por lo tanto se escoge un número de placas deflectoras inmediatamente superior al valor obtenido, es decir, 4 deflectores.

Las normas T.E.M.A. establecen el espesor de los deflectores mediante la siguiente tabla:

**Tabla A.5.7.**  
Normas T.E.M.A.: Espesor de deflectores

Nominal Shell ID	Plate Thickness					
	Unsupported tube length between central baffles. End spaces between tubesheets and baffles are not a consideration.					
	12 (305) and Under	Over 12 (305) to 24 (610) Inclusive	Over 24 (610) to 36 (914) Inclusive	Over 36 (914) to 48 (1219) Inclusive	Over 48 (1219) to 60 (1524) Inclusive	Over 60 (1524)
6 - 14 (152-356)	1/16 (1.6)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)
15 - 28 (381-711)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)
29 - 38 (737-965)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	5/16 (7.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)
39 - 60 (991-1524)	1/4 (6.4)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	5/8 (15.9)
61 - 100 (1549-2540)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	3/4 (19.1)	3/4 (19.1)

En el caso de estudio se tiene un diámetro de carcasa de 0,9652 m y un espaciamento entre deflectores de 39,4 in (1 m). Así se obtiene un espesor de deflectores de 0,375 in (9,53 mm).

El diámetro de la deflectora será un poco inferior al de la carcasa, poseyendo un segmento libre correspondiente al 25% del diámetro interior de la carcasa.

Sustituyendo en la **Ecuación A.5.49**:

$$\Delta P = \frac{0,028 \cdot \left( 5,41 \frac{kg}{m^2 \cdot s} \right)^2 \cdot (4 + 1) \cdot 0,9652 m}{0,0251 m \cdot 995,657 kg/m^3} = 0,158 Pa = 1,56 \cdot 10^{-6} atm$$

Por lo tanto, al ser la pérdida de carga en carcasa tan pequeña, la presión de salida del fluido que pasa por carcasa será prácticamente la misma de la obtenida en el **Apartado 5.8.** del presente anexo (es decir, 1,95 atm).

Se suman ambas pérdidas de carga obtenidas para conocer la pérdida de carga total:

$$\Delta P_{total} = 0,17 \text{ atm} + 1,56 \cdot 10^{-6} \text{ atm} = 0,17 \text{ atm}$$

#### 5.10. Material de aislamiento

Se usará como material de aislamiento del reactor lana de roca por ser económica y cumplir los requerimientos del equipo. Mediante la **Tabla A.13.18.** se obtiene que el espesor de lana de roca necesario debe ser de 50 mm para las condiciones a las que opera el reactor. Después el aislamiento de lana de roca se cubrirá con planchas de aluminio.

Este espesor se supuso en el **Apartado 5.7.** del presente anexo en la determinación del espesor debido a la carga por viento, y como se puede observar ambos valores son iguales, por lo que el espesor tomado en dicho apartado es totalmente correcto.

## ANEXO 6: Diseño del intercambiador IC-03

El intercambiador IC-03 es el que se encarga de enfriar la corriente proveniente del intercambiador IC-01 que se dirige al absorbedor A-01 mediante un intercambio de calor con agua líquida.

Como se comentó en la memoria, este intercambiador será de carcasa y tubos. A continuación estarán definidos los cálculos realizados para su diseño.

### 6.1. Características de las corrientes de entrada

El fluido frío posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{ent}$ ): 298 K
- ✓ Temperatura de salida ( $T_{sal}$ ): 349 K
- ✓ Temperatura media ( $T_{med}$ ): 323,5 K
- ✓ Viscosidad media ( $\mu$ ):  $6,375 \cdot 10^{-4}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ): 988,22 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Conductividad térmica ( $k$ ): 0,635 W/m·K
- ✓ Número de Prandtl (Pr): 4,245
- ✓ Presión de entrada (P): 1,15 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{molar}$ ): 110,397 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 1,987 kg/s

Las propiedades se han realizado como la media aritmética de las propiedades de tal compuesto a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida.

El fluido caliente posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{ent}$ ): 350 K
- ✓ Temperatura de salida ( $T_{sal}$ ): 310 K
- ✓ Temperatura media ( $T_{med}$ ): 330 K
- ✓ Viscosidad media ( $\mu$ ):  $1,727 \cdot 10^{-5}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ): 1,23 kg/m<sup>3</sup>

- ✓ Conductividad térmica (k): 0,067 W/m·K
- ✓ Número de Prandtl (Pr): 0,885
- ✓ Presión entrada (P): 1,198 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{\text{molar}}$ ): 156,35 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 4,316 kg/s

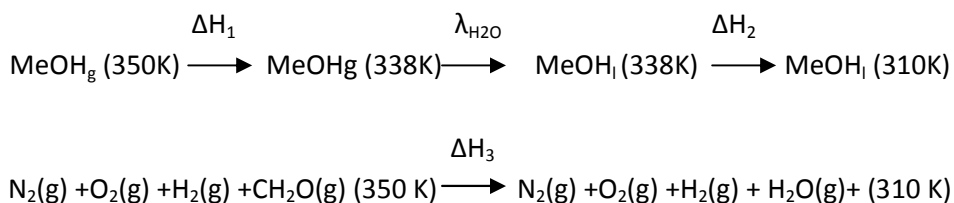
Las propiedades tomadas anteriormente (excepto las temperaturas, presión y caudales) se han tomado como la media ponderada de las propiedades de cada compuesto. Las propiedades de cada compuesto se han realizado como la media aritmética de las propiedades de tal compuesto a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida. La proporción de metanol en la corriente es tan pequeña (menor al 0,15%) que no se ha tenido en cuenta a este compuesto en la determinación de las propiedades.

## 6.2. Asignación de flujos

Los criterios en los que se basa la asignación de flujos en el intercambiador se encuentran en el **Apartado 7.1.3.** de la **Memoria Descriptiva** del presente Proyecto Fin de Carrera. Según estos criterios la corriente caliente, al poseer formaldehído, deberá ir por los tubos al necesitar este compuesto aceros especiales (y por lo tanto más caros) para su transporte y almacenamiento.

## 6.3. Cálculo del caudal de agua necesario

Para el diseño del presente intercambiador de calor se supuso una temperatura de salida del fluido frío para poder obtener el caudal necesario de éste. Realizando un balance de energía a la corriente caliente se obtiene:



Calculándose  $\Delta H_1$ ,  $\Delta H_2$  y  $\Delta H_3$  como:

$$\Delta H = -W \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [\text{A.6.1}]$$

Siendo W el caudal del compuesto,  $c_p$  la capacidad calorífica del compuesto y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas que sufre el compuesto.  $\Delta H_3$  se calculará como la suma de todas las entalpías que proporciona cada componente.

Así se calcula el calor desprendido como:

$$Q = -(\Delta H_1 + \lambda_{H_2O} + \Delta H_2 + \Delta H_3) \quad [A.6.2]$$

Aplicando las ecuaciones del **Apartado 2.1.** del **Anexo 2** se obtienen los valores de  $c_p$  medio (se obtienen estos valores como la media aritmética entre el valor a la temperatura inicial y el valor a la temperatura final):

**Tabla A.6.1.**  
Capacidades caloríficas medias de a corriente caliente

Capacidades caloríficas medias (cal/mol·K)	
$c_p(O_2)$	6,612
$c_p(H_2)$	6,887
$c_p(N_2)$	6,850
$c_p(MeOH)_g$	11,443
$c_p(MeOH)_l$	11,267
$c_p(CH_2O)$	8,726
$C_p(H_2O)$	8,026

Pasando las  $c_p$  medias a Julios, y como se conocen las composiciones molares y el caudal molar de la corriente caliente y sabiendo que  $\lambda_{MeOH} = 35200$  J/mol se obtienen las entalpías que intervienen en el proceso:

**Tabla A.6.2.**  
Entalpías del ciclo termodinámico del fluido caliente

$\Delta H_1$	- 26,622 J/s
$\Delta H_2$	-62,118 J/s
$\Delta H_3$	-1,816·10 <sup>5</sup> J/s
$\lambda_{MeOH}$	-6,824·10 <sup>3</sup> J/s

Mediante la **Ecuación A.6.2** se obtiene:

$$Q = 1,888 \cdot 10^5 \text{ J/s}$$

Se realiza un balance de energía al fluido frío:

$$Q = W_{frío} \cdot c_{pfrío} \cdot \Delta T \quad [A.6.3]$$

Siendo  $W_{frío}$  el caudal del fluido,  $c_{pfrío}$  su capacidad calorífica y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas que sufre la corriente.

Aplicando las ecuaciones del **Apartado 2.1.** del **Anexo 2** se obtienen los valores de  $c_p$  medio (se obtienen estos valores como la media aritmética entre el valor a la temperatura inicial y el valor a la temperatura final). Así se obtiene una  $c_{pfrío}$  igual a 8,023 cal/mol·K.



Pasando la  $c_p$  media a Julios, y como se conocen  $Q$  y la diferencia de temperaturas que sufre el fluido caliente, se puede obtener finalmente el caudal de vapor requerido:

$$W_{frío} = \frac{Q}{c_{pfrío} \cdot \Delta T} = \frac{1,888 \cdot 10^5 J/s}{33,536 J/mol \cdot K \cdot (349K - 298K)} = 110,397 mol/s = 1,987 kg/s$$

#### 6.4. Características del intercambiador

Se van a tomar las siguientes consideraciones para el diseño del intercambiador:

- Se escogerá un intercambiador de carcasa y tubos con un paso por carcasa y un paso por tubos.
- Los tubos estarán contruidos con Acero Carpenter 20 Mo-6 (es similar a la aleación Incoloy) debido a ser resistente a las atmósferas de formaldehído.
- La carcasa, al no estar en contacto con formaldehído, se construirá de Acero SA-240 (AISI 316L).
- El diámetro exterior de los tubos será de 5/4 de pulgada (1,25 in) y el diámetro interno será de 1,06 pulgadas (posteriormente se comprobará este diámetro).
- Los tubos estarán en configuración cuadrada con un pitch (o separación entre tubos) de 1 y 9/16 de pulgada (1,5625 in).

#### 6.5. Coeficiente global de transferencia de calor

Como se comentó en el **Apartado 3.5. del Anexo 3**, se puede definir el calor mediante la siguiente ecuación:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad [A.6.4]$$

Siendo  $U$  el coeficiente global de transferencia de calor:

$$\frac{1}{U} = \frac{D_o}{h_i \cdot D_i} + \frac{D_o \cdot \ln(r_o/r_i)}{2 \cdot k} + \frac{1}{h_o} \quad [A.6.5]$$

A continuación se calcularán los términos de la anterior ecuación

##### Coeficiente individual de convección interna ( $h_i$ )

El coeficiente individual de convección interna se obtiene mediante la definición del número de Nusselt:

$$Nu_d = \frac{h_i \cdot D_i}{k} \quad [A.6.6]$$

Siendo  $h_i$  el coeficiente individual de convección interna,  $k$  la conductividad de la sustancia y  $D_i$  el diámetro interior del tubo.

Primero se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{4 \cdot W_m}{\mu \cdot \pi \cdot D_i} \quad [A.6.7]$$

Siendo  $W_m$  el caudal másico del fluido que circula por el interior de los tubos,  $\mu$  la viscosidad de este fluido y  $D_i$  el diámetro interior del tubo. Como se tienen todas las propiedades (se encuentran al inicio del presente apartado de este Anexo) se calcula el valor de este número:

$$Re = \frac{4 \cdot 4,316 \frac{kg}{s}}{1,727 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s \cdot \pi \cdot 0,0269 m} = 1,183 \cdot 10^7$$

Como el valor del número de Reynolds es mayor a 10.000 el fluido en el interior de los tubos está en flujo turbulento. Se emplea la siguiente expresión para calcular el número de Nusselt (Mendia Urquiola, 1994):

$$Nu_d = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,3} \quad [A.6.8]$$

El exponente al que se encuentra elevado el número de Prandtl es 0,3 porque es el exponente que se usa para cuando la pared de los tubos se encuentra a menor temperatura que el fluido que circula por el interior de los tubos.

Mediante la **Ecuación A.6.8** se obtiene:

$$Nu_d = 0,023 \cdot (1,183 \cdot 10^7)^{0,8} \cdot 0,885^{0,3} = 10096,44$$

Se usa ahora la **Ecuación A.6.6** y se obtiene el valor del coeficiente individual de convección interna:

$$h_i = \frac{Nu_d \cdot k}{D_i} = \frac{10096,44 \cdot 0,067 \frac{W}{m \cdot K}}{0,0269 m} = 2,51 \cdot 10^4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

### Coeficiente individual de convección externa ( $h_0$ )

El coeficiente individual de convección externa se obtiene de la misma manera que el coeficiente individual de convección interna pero mediante las siguientes ecuaciones:

$$Nu_d = \frac{h_0 \cdot D_0}{k} \quad [A.6.9]$$

$$Re = \frac{4 \cdot W_m}{\mu \cdot \pi \cdot D_0} \quad [A.6.10]$$

Como se tienen todas las propiedades (se encuentran al inicio del presente apartado de este Anexo) se calcula el valor de este número:

$$Re = \frac{4 \cdot 1,987 \frac{kg}{s}}{6,375 \cdot 10^{-4} Pa \cdot s \cdot \pi \cdot 0,03175 m} = 1,250 \cdot 10^5$$

Como el valor del número de Reynolds es mayor a 10.000 el fluido en el exterior de los tubos está en flujo turbulento. Se emplea la siguiente expresión para calcular el número de Nusselt (Mendia Urquiola, 1994):

$$Nu_d = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,3} \quad [A.6.11]$$

Mediante la **Ecuación A.6.11** se obtiene:

$$Nu_d = 0,023 \cdot (1,250 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 4,254^{0,3} = 424,23$$

Se usa ahora la **Ecuación A.6.9** y se obtiene el valor del coeficiente individual de convección externa:

$$h_0 = \frac{Nu_d \cdot k}{D_0} = \frac{424,23 \cdot 0,635 \text{ W/m} \cdot K}{0,03175 \text{ m}} = 8484,54 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

### Conductividad del material (k)

La conductividad del material (Acero Carpenter 20 Mo-6) se obtiene de la **Tabla A.13.10.**, e interpolando entre las temperaturas de entrada y salida de los fluidos se tiene:

$$k = 12,1 \text{ W/m} \cdot K$$

Ya obtenidos estos parámetros se puede calcular el coeficiente global de transferencia de calor mediante la **Ecuación A.6.5** Sustituyendo los valores se obtiene:

$$U = 2615,89 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

## 6.6. Cálculo del área de intercambio de calor

Mediante la **Ecuación A.6.4** se puede obtener el área de intercambio de calor si conocemos tanto U (coeficiente global de transferencia de calor, calculado en el **Apartado 6.5.** del presente anexo), Q (calor intercambiado, calculado en el **Apartado 6.3.** del presente anexo) y  $\Delta T_{ml}$  (diferencia de temperatura media logarítmica).

Por ello se procede al cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica, que se define como:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{cale} - T_{frío_s}) - (T_{cal_s} - T_{frío_e})}{\ln \left( \frac{T_{cale} - T_{frío_s}}{T_{cal_s} - T_{frío_e}} \right)} \quad [A.6.12]$$

Mediante la sustitución de las temperaturas se obtiene:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(350K - 349K) - (310K - 298K)}{\ln \left( \frac{350K - 349K}{310K - 298K} \right)} = 4,43 \text{ K}$$

Ya se puede calcular el área de intercambio de calor mediante la **Ecuación A.6.10**:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{1,888 \cdot 10^5 J/s}{2615,89 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 4,43 K} = 16,304 m^2$$

## 6.7. Número y longitud de los tubos

La ecuación que permite el cálculo del número de los tubos es la siguiente:

$$N_{tubos} = \frac{m_f}{v \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \rho} \quad [A.6.13]$$

Siendo  $v$  la velocidad de paso del fluido por el interior de los tubos,  $\rho$  la densidad de ese fluido y  $m_f$  el caudal másico del fluido (lo que hemos denominado anteriormente como  $W$ ).

Se usa una velocidad que se encuentre en el rango de velocidades comunes para la condiciones del fluido con el que estamos operando. En nuestro caso, el fluido es un gas sobrecalentado a presión entre 0 y 10 psig (1 atm a 1,68 atm) que circula por tubos con diámetros menores a 6 pulgadas, por lo que el rango de velocidades se encuentra entre 50 ft/s y 140 ft/s (15,24 m/s y 42,672 m/s). Se va a usar un valor aproximadamente que se encuentra en el promedio de ambos valores, y este valor será de 25 m/s.

Así se obtiene:

$$N_{tubos} = \frac{4,316 kg/s}{25 m/s \cdot \frac{\pi \cdot (0,0269)^2 m^2}{4} \cdot 1,23 kg/m^3} = 246,53$$

Por lo tanto se necesitan como mínimo 247 tubos, mediante la **Tabla A.13.5**. se obtiene para configuración cuadrada con un paso por tubos y un diámetro exterior de tubo de 1,25 pulgadas un número de tubos igual a 252. Con estas características se obtiene un diámetro de carcasa de 33 pulgadas (0,8382 m) y un pitch de una y 9/16 de pulgada (0,0397 m).

Se calcula a continuación la longitud de los tubos mediante la ecuación de definición del área de un cilindro aplicada al conjunto de los tubos:

$$A_0 = \pi \cdot D_0 \cdot N \cdot L \quad [A.6.14]$$

Se sustituyen los términos y se obtiene:

$$L = \frac{A_0}{\pi \cdot D_0 \cdot N} = \frac{16,304 m^2}{\pi \cdot 0,0375 m \cdot 252} = 0,649 m = 2,128 ft$$

Por tanto, se tomará una longitud normalizada de 2,5 pies (0,762 m) para la longitud de los tubos.

## 6.8. Tamaño de carcasa y deflectores

Como se comentó anteriormente el diámetro de la carcasa es de 33 pulgadas (0,8382 m).

El número de deflectores se calcula mediante la ecuación:

$$N_c = \frac{L}{P_{def}} \quad [A.6.15]$$

Donde L es la longitud de los tubos y  $P_{def}$  es la distancia entre deflectores

En las normas T.E.M.A. existen un criterio para la determinación de la distancia mínima y máxima entre deflectores. Así la distancia mínima entre deflectores se define como la mayor de las distancias siguientes:

- 2 pulgadas (0,0508 m)
- 1/5 del diámetro de la carcasa (0,0508 m)

En este caso ambos valores son los mismos, por lo que la distancia mínima entre deflectores será de 0,508 m.

La distancia máxima entre deflectores se determina mediante la siguiente tabla:

**Tabla A.6.3.**  
Normas T.E.M.A.: Separación máxima entre deflectores

Tube OD	Tube Materials and Temperature Limits ° F ( ° C)	
	Carbon Steel & High Alloy Steel, 759 (399) Low Alloy Steel, 850 (454) Nickel-Copper, 600 (316) Nickel, 850 (464) Nickel-Chromium-Iron, 1000 (538)	Aluminum & Aluminum Alloys, Copper & Copper Alloys, Titanium Alloys At Code Maximum Allowable Temperature
1/4 (6.4)	26 (660)	22 (559)
3/8 (9.5)	35 (889)	30 (762)
1/2 (12.7)	44 (1118)	38 (965)
5/8 (15.9)	52 (1321)	45 (1143)
3/4 (19.1)	60 (1524)	52 (1321)
7/8 (22.2)	69 (1753)	60 (1524)
1 (25.4)	74 (1880)	64 (1626)
1-1/4 (31.8)	88 (2235)	76 (1930)
1-1/2 (38.1)	100 (2540)	87 (2210)
2 (50.8)	125 (3175)	110 (2794)

En el caso en estudio la aleación empleada es Acero Carpentier 20 Mo-6 , que es una aleación de níquel, cromo y hierro (y otros compuestos en menor proporción), y el diámetro externo de los tubos es 1,25 pulgadas. Así se obtiene una distancia máxima entre deflectores de 88 pulgadas (2,235 m).

Para obtener la distancia entre deflectores se va a realizar la media aritmética entre los valores mínimo y máximo de distancia entre deflectores:

$$P_{def} = \frac{0,0508m + 2,235m}{2} = 1,1429m$$

Se aproxima este valor obtenido a una distancia entre deflectores de 1,2 m.

Usando la **Ecuación A.6.15** se obtiene:

$$N_c = \frac{0,762 m}{1,2 m} = 0,64$$

Por lo tanto el intercambiador no necesita ninguna placa deflector al ser el número muy inferior a uno.

## 6.9. Diseño mecánico

En el diseño mecánico se expondrán los cálculos realizados para la obtención de los espesores de tubo y de carcasa.

### 6.9.1. Espesor de tubos

Para la determinación del espesor de los tubos debido a la presión interna se empleará la expresión que permite calcularlo mediante código ASME B.31.3. Este espesor se calcula igual para toda tubería de proceso. La ecuación es la que sigue:

$$t = \left( \frac{P_D \cdot D_0}{2 \cdot (S \cdot E + P_D \cdot Y)} + C \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - M/100} \right) \quad [A.6.16]$$

Siendo:

E: eficiencia de soldadura

S: tensión máxima permisible

Y: coeficiente dependiente de la temperatura de operación y del material de los tubos

P<sub>D</sub>: presión de diseño

D<sub>0</sub>: diámetro externo de los tubos

M: margen de tolerancia de fabricación

C: margen por corrosión

Se determina a continuación cada uno de esos parámetros:

- Eficiencia de soldadura (E):  
Se observa en la tabla UW-12 del Código ASME VIII-Div.1 que E toma el valor de 1 para una junta a tope u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado por el interior y el exterior de los tubos.
- Tensión máxima admisible (S):

Según se puede observar en la **Tabla A.13.10.** la tensión máxima admisible para Acero Carpentier 20 Mo-6 es de 41000 psi para temperaturas que rondan los 400K (se escoge una temperatura inmediatamente superior a la temperatura máxima de los fluidos).

- Factor Y:  
Como se puede observar en la **Tabla A.13.13.** para Acero Carpentier 20 Mo-6 (otros metales dúctiles) a temperaturas inferiores a 900 °F el valor del término Y es 0,4.
- Presión de diseño ( $P_D$ ):  
La presión de diseño se calcula como la presión a la que se opera aumentada un 10%:

$$P_D = 1,198 \cdot 1,15 atm = 1,3178 atm = 19,11 psi$$

- Diámetro exterior de los tubos ( $D_0$ ):  
El diámetro exterior de los tubos es 1,25 in.
- Margen de tolerancia a la fabricación (M):  
Las tuberías sin costura poseen un valor alto de tolerancia a la fabricación, en el caso en estudio este margen es de un 12,5%.
- Margen de corrosión (C):  
El Código ASME VII-Div.1 se debe tener en cuenta para diseñar las unidades de proceso que puedan estar sometidas a corrosión, erosión o abrasión mecánica un margen de corrosión, el cual predice el desgaste del espesor y así la vida útil del equipo sea la correcta. Para ello los cálculos pertinentes se deben de llevar a cabo en condiciones corroídas para garantizar la validez de estos cálculos.

Se considera un desgaste de corrosión para tuberías y depósitos de 5 milésimas de pulgada por año. Para los equipos principales (como es el caso) se usan vidas útiles de 15-20 años, usando aquí el valor de 15 años como vida útil del presente intercambiador. Se calcula a continuación el valor de C:

$$C = 15 \text{ años} \cdot 0,005 \text{ in/año} = 0,075 \text{ in} = 0,1905 \text{ cm}$$

Se puede ya el espesor de los tubos mediante la **Ecuación A.6.15**:

$$t = \left( \frac{19,11 psi \cdot 1,25 in}{2 \cdot (41000 psi \cdot 1 + 19,11 psi \cdot 0,4)} + 0,075 \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,0860 in$$

Se obtiene mediante la **Tabla A.13.6.** el espesor normalizado de 0,095 in que es el inmediatamente superior al espesor obtenido. Por lo tanto, los tubos serán 13 BWG (espesor 0,095 in, diámetro interior 1,06 in (0,0269 m)). Por lo tanto el diámetro interior coincide con el supuesto en el **Apartado 6.4.** del presente Anexo.

### 6.9.2. Espesor de la carcasa

Para la determinación del espesor de la carcasa se deben indicar con anterioridad una serie de datos:

- **Espesor mínimo de pared:**  
Se debe escoger un espesor mínimo de pared tanto si se aplican las normas como los códigos. Así por la fórmula de aceros inoxidables:

$$t_{min} = 3mm$$

Por el Código ASME VII-Div 1:

$$t_{min} = 2,5 + C = 2,5mm + 1,905 mm = 4,405 mm$$

Se escoge de ambos el mayor espesor (4,405 mm).

- **Presión y temperaturas de diseño ( $P_D$  y  $T_D$ ):**  
La presión de diseño se considera la mayor de las siguientes presiones:
  - 30psi
  - Un 10% más de la de operación (en el caso en estudio 18,34 psi)

En este caso se escoge una presión de diseño de 30 psi.

La temperatura de diseño se calcula:

$$T_D = T_{maxop} + 20^{\circ}C = (350 K - 273 K) + 20^{\circ}C = 97^{\circ}C = 206,6^{\circ}F$$

- **Tensión máxima admisible (S):**  
Según se puede observar en la **Tabla A.13.9.** la tensión máxima admisible para acero SA-240 es de 20000 psi para temperaturas que rondan los 200 °F.
- **Eficiencia de soldadura (E):**  
Se observa en la tabla UW-12 del código ASME VIII-Div.1 que E toma el valor de 0,85 para una junta a tope con doble cordón u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado, y siendo examinadas las juntas por zonas.

Antes de realizar ningún cálculo se deben conocer cuáles son las tensiones a las que se encuentra sometido el equipo en estudio.



**Tabla A.6.5.**

Tensiones que influyen en el equipo (Megyesy, E.F., 2001)

	Tensiones circunferenciales		Tensiones longitudinales	
Carga	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión
Peso				X
Viento			X	X
Seísmo			X	X
Presión interior	X		X	
Presión exterior				

Debido a que las tensiones debidas a sismos y a viento son despreciables frente a la ejercida por la presión interior, estas tensiones no se tendrán en cuenta en los cálculos, aunque al escoger el espesor normalizado de la carcasa se tendrá un sobredimensionamiento del espesor que cubrirá las tensiones despreciadas.

Según el Código ASME VII-Div. 1 existen dos tensiones diferentes en cuanto al cálculo del espesor debido a la presión interior: las tensiones circunferenciales y las tensiones longitudinales. Así, se calcularán ambos espesores y se usará el que sea mayor.

- Tensiones circunferenciales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{circ} = \frac{P_D \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_D} \quad [A.6.17]$$

Siendo:

E: eficiencia de soldadura  
S: tensión máxima permisible (psi)  
R: radio de la carcasa (in)  
P<sub>D</sub>: presión de diseño (psi)

Sustituyendo:

$$t_{circ} = \frac{30psi \cdot 16,5 in}{20000psi \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 30psi} = 0,029in = 0,740mm$$

- Tensiones longitudinales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{long} = \frac{P_D \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_D} \quad [A.6.18]$$

Sustituyendo:

$$t_{long} = \frac{30psi \cdot 16,5 in}{2 \cdot 20000psi \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 30psi} = 0,015in = 0,370mm$$

Se escoge el mayor espesor entre ambas, es decir,  $t = 0,029 \text{ in}$ . A este valor se le suma el desgaste por corrosión:

$$t = 0,029 \text{ in} + 0,075 \text{ in} = 0,104 \text{ in} = 2,641 \text{ mm}$$

Como este valor de espesor es menor al espesor mínimo, se usará el valor del espesor mínimo. Se normaliza este valor de espesor y se obtiene:

$$t = 0,2 \text{ in} = 0,508 \text{ cm} = 0,00508 \text{ m}$$

## 6.10. Pérdidas de carga

En este apartado se calcularán las pérdidas de carga tanto en tubos como en carcasa.

### 6.10.1. Pérdidas de carga en tubos

La pérdida de carga en tubos se calcula mediante la ecuación de Fanning:

$$\Delta P = \frac{f \cdot G^2 \cdot L}{D_i \cdot \rho} \quad [\text{A.6.19}]$$

Siendo:

L: longitud de los tubos (m).

$D_i$ : diámetro interno de los tubos (m).

f: factor de fricción

$\rho$ : densidad del fluido que circula por los tubos ( $\text{kg/m}^3$ )

G: velocidad másica ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

La velocidad másica se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G = \frac{4 \cdot M \cdot n_t}{\pi \cdot D_i^2 \cdot N_t} \quad [\text{A.6.20}]$$

Siendo:

M: caudal másico ( $\text{kg/s}$ )

$n_t$ : número de pasos por tubos

$N_t$ : número de tubos

$D_i$ : diámetro interno de los tubos (m).

Sustituyendo en la **Ecuación A.6.19**:

$$G = \frac{4 \cdot 4,316 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,0269 \text{ m})^2 \cdot 252} = 30,14 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Para obtener el factor de fricción se necesita del uso del valor del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Así el número de Reynolds se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{G \cdot D_i}{\mu}$$

$$Re = \frac{G \cdot D_i}{\mu} = \frac{30,14 \frac{kg}{m^2 \cdot s} \cdot 0,0269m}{1,727 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s} = 4,69 \cdot 10^4$$

La rugosidad relativa para el diámetro de tubo escogido y aceros comerciales es de 0,0003. Con estos datos en la gráfica de Moody se obtiene un valor de factor de fricción igual a 0,0225.

Sustituyendo en la **Ecuación A.6.18**:

$$\Delta P = \frac{0,0225 \cdot \left( 30,14 \frac{kg}{m^2 \cdot s} \right)^2 \cdot 0,762m}{0,0269m \cdot 1,23kg/m^3} = 470,60Pa = 4,64 \cdot 10^{-3} atm$$

Por tanto la presión de salida del fluido que va por tubos es prácticamente la misma a la que entró debido a las pérdidas de carga tan bajas que sufre:

$$P_{sal} = 1,198 atm$$

### 6.10.2. Pérdidas de carga en carcasa

Las pérdidas de carga en carcasa se obtienen mediante el método de CERN:

$$\Delta P = \frac{f_c \cdot G_c^2 \cdot (N_c + 1) \cdot D_c}{D_e \cdot \rho} \quad [A.6.21]$$

Siendo:

- $f_c$ : factor de fricción en carcasa.
- $G_c$ : velocidad másica en carcasa ( $kg/m^2 \cdot s$ ).
- $N_c$ : número de deflectores.
- $D_c$ : diámetro de la carcasa (m)
- $D_e$ : diámetro equivalente (m)

La velocidad másica en carcasa se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G_c = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot (D_c^2 - N_t \cdot D_0^2) \cdot X} \quad [A.6.22]$$

Siendo M el caudal másico del fluido que circula por la carcasa y X el cociente entre el pitch y el diámetro exterior de los tubos:

$$X = \frac{pitch}{D_0} = \frac{1,5625in}{1,25in} = 1,25$$

Sustituyendo en la **Ecuación A.6.21**:

$$G_c = \frac{4 \cdot 1,987 \text{ kg/s}}{\pi \cdot ((0,8382 \text{ m})^2 - 252 \cdot (0,03175 \text{ m})^2) \cdot 1,25} = 4,51 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

El factor de fricción necesita del cálculo del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Así, el número de Reynolds:

$$Re = \frac{G_c \cdot D_c}{\mu} = \frac{4,51 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot 0,8382 \text{ m}}{6,375 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 5,93 \cdot 10^3$$

Conociendo que la rugosidad relativa para ese diámetro de carcasa y acero comerciales es de 0,00015, se obtiene del gráfico de Moody un valor de factor de fricción de 0,032.

Para disposición cuadrada la determinación del diámetro equivalente se sigue la siguiente ecuación:

$$D_e = \frac{4 \cdot \text{pitch}^2}{\pi \cdot D_0} - D_0 \quad [\text{A.6.23}]$$

$$D_e = \frac{4 \cdot (0,0397 \text{ m})^2}{\pi \cdot 0,03175 \text{ m}} - 0,03175 \text{ m} = 0,0314 \text{ m}$$

Sustituyendo en la **Ecuación A.6.20**:

$$\Delta P = \frac{0,032 \cdot \left( 4,51 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \right)^2 \cdot (0 + 1) \cdot 0,8382 \text{ m}}{0,0314 \text{ m} \cdot 988,22 \text{ kg/m}^3} = 0,018 \text{ Pa} = 1,74 \cdot 10^{-7} \text{ atm}$$

Por lo tanto, al ser la pérdida de carga en carcasa tan pequeña, la presión de salida del fluido que pasa por carcasa será prácticamente la misma a la que entró, es decir, 1,15 atm.

La pérdida de carga total, al ser ambas pérdidas de carga despreciables, será también despreciable.

## 6.11. Material de aislamiento

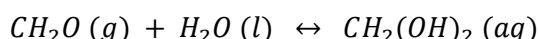
Se usará como material de aislamiento del intercambiador lana de roca por ser económica y cumplir los requerimientos del equipo. Mediante la **Tabla A.13.18**, se obtiene que el espesor de lana de roca necesario debe ser de 50 mm para las condiciones a las que opera el intercambiador. Después el aislamiento de lana de roca se cubrirá con planchas de aluminio.

## ANEXO 7: Diseño del absorbedor A-01

El absorbedor A-01 es la instalación que se encarga de solubilizar en agua el formaldehído que se encuentra en la corriente proveniente de intercambiador IC-03 mediante una absorción con reacción química. Se separarán así el formaldehído, el agua y el metanol de esa corriente, del resto de componentes (todos gases a temperatura ambiente: hidrógeno, nitrógeno y oxígeno), obteniéndose así una mezcla líquida, que será llevada al intercambiador IC-04 para enfriarla. De esta corriente, una parte se recirculará al absorbedor y el resto será enviada al mezclador M-01 donde se obtendrá el producto final. La corriente gaseosa de salida del absorbedor será enviada a una antorcha. Como se comentó en la memoria, este absorbedor será una torre de relleno. A continuación estarán definidos los cálculos realizados para su diseño.

### 7.1. Reacción química

La reacción química que se produce en el absorbedor es la siguiente:



Esta reacción es reversible, aunque está muy desplazada a la formación de metilenglicol debido a que es muy estable en agua. Es una reacción casi instantánea y el metilenglicol obtenido se puede fácilmente volver a transformar en formaldehído en caso de necesidad.

Es una reacción exotérmica con una entalpía estándar de reacción de -21,4 kJ/mol. Al ser la temperatura a la que opera el absorbedor tan cercana a 298 K (se opera a 320 K aproximadamente), se ha supuesto que a esta temperatura la entalpía de reacción es la misma a la estándar. Se ha realizado esta simplificación por no poseer los datos de la  $c_p$  del metilenglicol, pero considerando el metilenglicol como agua y metanol (que ya es introducir un error), se obtiene una entalpía de reacción que es solo un 3,73% menor a la estándar (habiendo calculado todos los cambios de temperaturas de las sustancias que intervienen en la reacción), por lo tanto, al ser el error tan pequeño se considera despreciable y se emplea la entalpía de reacción estándar.

La conversión de esta reacción puede llegar a ser casi total, por lo que en el caso en estudio se va a fijar una conversión del 99,95% del formaldehído que entra en la columna. El gas de salida del absorbedor, al contener formaldehído, aunque en una cantidad ínfima (sólo el 0,05% del formaldehído que entra en la columna), se llevará a antorcha para su combustión debido a los efectos adversos del formaldehído en la salud.

Debido a que la cantidad de formaldehído en los gases de salida es tan pequeña, las propiedades de esa corriente no se han calculado teniendo en cuenta la cantidad de formaldehído.

## 7.2. Características de las corrientes de entrada

El fluido de entrada gaseoso posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{ent}$ ): 310 K
- ✓ Viscosidad media( $\mu$ ):  $1,646 \cdot 10^{-5}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ):  $1,36 \text{ kg/m}^3$
- ✓ Presión de entrada (P): 1,193 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{molar}$ ): 156,35 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 4,316 kg/s

Las propiedades tomadas anteriormente (excepto las temperaturas, presión y caudales) se han tomado como la media ponderada de las propiedades de cada compuesto. Las propiedades de cada compuesto se han realizado como la media aritmética de las propiedades de tal compuesto a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida. Al ser la mayor parte de esta corriente un gas a la temperatura de entrada (el metanol y el agua son líquidos a 310 K, siendo la suma de las proporciones de éstos menor a un 7% en moles) se ha decidido no tener en cuenta ambos compuestos en la determinación de propiedades.

El fluido de entrada líquido posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{ent}$ ): 310 K
- ✓ Viscosidad media( $\mu$ ):  $5,735 \cdot 10^{-4}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ):  $884,75 \text{ kg/m}^3$
- ✓ Presión entrada (P): 1,2 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{molar}$ ): 25,928 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 0,586 kg/s

Al igual que con el fluido frío, las propiedades tomadas anteriormente (excepto las temperaturas, presión y caudales) se han tomado como la media ponderada de las propiedades de cada compuesto. Las propiedades de cada compuesto se han realizado como la media aritmética de las propiedades de tal compuesto a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida.

Debido a que el metilenglicol no es un compuesto que se haya comprobado científicamente que exista, algunas de las propiedades se han hallado mediante las proporciones de la corriente compuesta por agua, metanol y formaldehído (aunque en la realidad estaría formada por agua, metanol y metilenglicol).

## 7.3. Cálculo de la temperatura de las corrientes de salida

Debido a ser la reacción exotérmica, se producirá un aumento de la temperatura en el absorbedor, por lo que las corrientes de salida saldrán a una temperatura mayor de la que entraron. Se realiza un balance de energía al absorbedor:

$$(E) + (G) = (S) + (C) \quad [A.7.1]$$

Siendo (E) el cómputo de las entradas al absorbedor, (G) la generación, (S) las salidas y (C) el consumo. Al ser nuestra reacción exotérmica, el término de consumo no existirá, por lo que el término de consumo se eliminará, quedando:

$$(E) + (G) = (S) \quad [A.7.2]$$

Los términos de entrada y salida se pueden aglutinar en el término de diferencia de entalpía de la corriente global (es decir, la suma de las corrientes de entrada o de las de salida, debido a que no existe prácticamente disminución de volumen). Así:

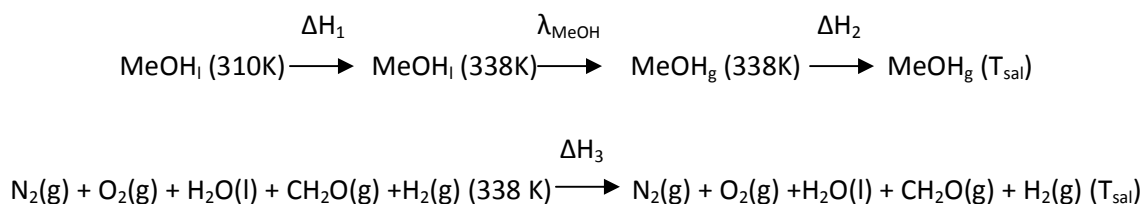
$$\Delta H_{corriente} = \frac{(-\Delta H_R) \cdot F_{A0}}{(-v_A)} \cdot (x_A - x_{A0}) \quad [A.7.3]$$

Siendo  $F_{A0}$  el caudal molar de entrada del reactivo limitante A,  $x_A$  y  $x_{A0}$  las conversiones de ese reactivo en cualquier punto del reactor y a la entrada del reactor respectivamente,  $(-v_A)$  es el coeficiente estequiométrico del reactivo A (en el caso en estudio, el formaldehído),  $(-\Delta H_R)$  es la entalpía de reacción, y  $\Delta H_{corriente}$  es la diferencia de entalpía de la corriente global.

Se puede sustituir el segundo término y se obtiene:

$$Q = \frac{(-21,4 \text{ kJ/mol}) \cdot 9,712 \text{ mol/s}}{1} \cdot (0,9995 - 0) = -207,73 \text{ kJ/s}$$

Se realiza un balance de energía a la corriente global:



Calculándose  $\Delta H_1$ ,  $\Delta H_2$  y  $\Delta H_3$  como:

$$\Delta H = W \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [A.7.4]$$

Siendo W el caudal del compuesto,  $c_p$  la capacidad calorífica del compuesto y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas que sufre el compuesto.  $\Delta H_3$  se calculará como la suma de todas las entalpías que proporciona cada componente.

Así el calor desprendido del fluido caliente será:

$$Q = \Delta H_1 + \lambda_{MeOH} + \Delta H_2 + \Delta H_3 \quad [A.7.5]$$

Se usará como corriente global la corriente de salida, y se calcularán las proporciones de los compuestos en dicha corriente (suma de las corrientes de salida). Aplicando las ecuaciones del **Apartado 2.1.** del **Anexo 2** se obtienen los valores de  $c_p$  medio (se obtienen estos valores como la media aritmética entre el valor a la temperatura inicial y el valor a la temperatura final (se supondrá una temperatura de salida inicial, y después se irá corrigiendo conforme el valor obtenido de  $T_{sal}$  hasta que este valor de temperatura se estabilice (estas  $c_p$  son las definitivas, es decir, las que se obtienen con el valor exacto de  $T_{sal}$ )):

**Tabla A.7.1.**

Capacidades caloríficas medias de la corriente global

Capacidades caloríficas medias (cal/mol·K)	
$c_p(O_2)$	6,826
$c_p(H_2)$	6,887
$c_p(N_2)$	6,850
$c_p(MeOH)_g$	11,446
$c_p(MeOH)_l$	8,840
$c_p(H_2O)$	8,017
$c_p(CH_2O)$	8,727

Pasando las  $c_p$  medias a Julios, y como se conocen las composiciones molares y el caudal molar de la corriente caliente, y sabiendo que  $\lambda_{MeOH} = 35200$  J/mol, se pueden obtener  $\Delta H_1$  y  $\lambda_{MeOH}$ :

**Tabla A.7.2.**

Entalpías del ciclo termodinámico del fluido frío

$\lambda_{MeOH}$	$1,39 \cdot 10^4$ J/s
$\Delta H_1$	97,98 J/s

Despejando términos se puede obtener la siguiente ecuación:

$$\Delta H_2 + \Delta H_3 = \Delta H_1 + \lambda_{MeOH} + Q \quad [A.7.6]$$

Siendo:

$$\Delta H_3 = (W_{H_2} \cdot c_{pH_2} + W_{N_2} \cdot c_{pN_2} + W_{O_2} \cdot c_{pO_2} + W_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} + W_{CH_2O} \cdot c_{pCH_2O}) \cdot (T_{sal} - 310) \quad [A.7.7]$$

$$\Delta H_2 = W_{MeOH} \cdot c_{pMeOHg} \cdot (T_{sal} - 338) \quad [A.7.8]$$

Como se tienen todos los datos excepto  $T_{sal}$ , que es nuestra incógnita, se puede resolver la ecuación obteniendo:

$$T_{sal} = 350,38 \text{ K}$$



## 7.4. Características de las corrientes de salida

El fluido de salida gaseoso posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de salida ( $T_{sal}$ ): 350,38 K
- ✓ Viscosidad media( $\mu$ ):  $2,001 \cdot 10^{-5}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ): 1,20 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Presión de entrada (P): 1,193 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{molar}$ ): 136,145 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 3,853 kg/s

Las propiedades tomadas anteriormente (excepto las temperaturas, presión y caudales) se han tomado como la media ponderada de las propiedades de cada compuesto. Las propiedades de cada compuesto se han realizado como la media aritmética de las propiedades de tal compuesto a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida. Al ser la mayor parte de esta corriente un gas a la temperatura de entrada (el metanol y el agua son líquidos a 310 K, siendo la suma de las proporciones de éstos menor a un 7% en moles) se ha decidido no tener en cuenta ambos compuestos en la determinación de propiedades.

El fluido de salida líquido posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{sal}$ ): 350,38 K
- ✓ Viscosidad media( $\mu$ ):  $2,354 \cdot 10^{-4}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ): 818,57 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Presión entrada (P): 1,2 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{molar}$ ): 45,55 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 1,059 kg/s

Al igual que con el fluido frío, las propiedades tomadas anteriormente (excepto las temperaturas, presión y caudales) se han tomado como la media ponderada de las propiedades de cada compuesto. Las propiedades de cada compuesto se han realizado como la media aritmética de las propiedades de tal compuesto a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida.

Debido a que el metilenglicol no es un compuesto que se haya comprobado científicamente que exista, algunas de las propiedades se han hallado mediante las proporciones de la corriente compuesta por agua, metanol y formaldehído (aunque en la realidad estaría formada por agua, metanol y metilenglicol).

Debido a que el metanol es muy soluble en agua se supondrá que estará disuelto en todo momento en el agua líquida. Por ello, se supondrá que actúa como metanol líquido, es decir,

que se han calculado las propiedades del metanol como las de metanol líquido (aunque esta suposición no es del todo válida, si se puede realizar debido a la baja proporción de metanol en la corriente y debido a que al estar soluble las propiedades se asemejarán a las de un líquido).

### 7.5. Características del absorbedor

Se van a tomar las siguientes consideraciones para el diseño del absorbedor:

- Se escogerá una columna de relleno de anillos Raschig de 1 in.
- El equipo estará construido con Acero Carpenter 20 Mo-6 (es similar a la aleación Incoloy) debido a ser resistente a las atmósferas de formaldehído.

### 7.6. Módulo de Hatta

El módulo de Hatta es un parámetro que permite evaluar si la etapa limitante es la reacción química o en caso contrario es la difusión en el líquido. Dependiendo del valor obtenido de este parámetro, se usará un tipo u otro de torre de absorción. La ecuación que define al módulo de Hatta es la siguiente:

$$M_H = \frac{\sqrt{k \cdot \mathcal{D}_{Al} \cdot C_{Bl}}}{k_{Al}} \quad [A. 7.9]$$

Siendo  $M_H$  el módulo de Hatta,  $k$  la constante cinética de la reacción,  $\mathcal{D}_{Al}$  la difusividad del compuesto A (en el caso en estudio el compuesto A es el formaldehído) en el líquido,  $C_{Bl}$  es la concentración del reactivo que se encuentra en la fase líquida (en el caso en estudio, el agua), y  $k_{Al}$  es el coeficiente de transferencia de materia del componente A en el líquido.

Cuando el módulo de Hatta es mayor a 2 la reacción química es casi instantánea frente a la difusión en el líquido y la columna de absorción más adecuada para este tipo de caso es una columna donde exista mucha área interfacial entre el gas y el líquido (por lo que el mejor tipo de absorción es una columna de relleno).

En cambio, cuando módulo de Hatta es menor a 0,02 la reacción química es muy lenta frente a la difusión en el líquido y la columna de absorción más adecuada para este tipo de caso es una columna donde el líquido esté retenido durante mucho tiempo (por lo que el mejor tipo de absorción es una columna de burbujeo).

Existen otros tipos de columna de absorción como son la de platos o la de lluvia que se usan para condiciones especiales.

Para obtener un valor correcto del módulo de Hatta se deberá calcular este parámetro en la parte superior de la columna y en la parte inferior.

### 7.6.1. Módulo de Hatta en la parte superior de la columna

- **Difusividad del formaldehído en el líquido**

Este parámetro ha sido calculado mediante la **Ecuación A.2.25** del **Apartado 2.5.** del **Anexo 2.** Gracias a esta ecuación empírica y a la determinación del volumen mediante el uso de la densidad molar, se obtiene como resultado:

$$\mathcal{D}_A = 1,093 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$$

- **Constante cinética**

La expresión de la constante cinética depende de la temperatura de la siguiente manera (Jozef Gerhardus Maria Winkelman, 2003):

$$k = 2,04 \cdot 10^5 \cdot e^{\left(\frac{-2936}{T}\right)} \quad [\text{A.7.10}]$$

Estando  $k$  medida en  $\text{s}^{-1}$  y  $T$  en K. Debido a que la reacción se da en el líquido, se ha escogido la temperatura como la del líquido en ese punto, es decir, 310 K. Sustituyendo se obtiene:

$$k = 2,04 \cdot 10^5 \cdot e^{\left(\frac{-2936}{310}\right)} = 15,720 \text{ s}^{-1}$$

Para el cálculo del módulo de Hatta las unidades de  $k$  deben ser  $\text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{s}$ , por lo que se realizará el cambio a continuación mediante el uso de la densidad y los caudales del líquido:

$$k = 15,720 \text{ s}^{-1} \cdot \frac{\text{m}^3}{884,75 \text{ kg}} \cdot \frac{0,586 \text{ kg}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{s}}{25,928 \text{ mol}} \cdot \frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kmol}} = 0,402 \text{ m}^3/\text{kmol} \cdot \text{s}$$

- **Concentración de agua**

Para la determinación de la concentración de agua se ha realizado el cálculo de los moles de agua en la corriente líquida, y se ha dividido entre el volumen de líquido:

$$c_B = \left( \frac{0,389 \cdot \frac{16,216 \text{ mol}}{\text{s}}}{\frac{\text{m}^3}{884,75 \text{ kg}} \cdot \frac{0,586 \text{ kg}}{\text{s}}} \right) \cdot \frac{1 \text{ kmol}}{1000 \text{ mol}} = 9,52 \text{ kmol}/\text{m}^3$$

En este caso se ha usado 16,216 mol/s al ser necesario usar la cantidad real de agua en la corriente (recordar que en la mayor parte del presente anexo se ha supuesto el metilenglicol como una molécula de agua unida a una de formaldehído).

- **Coefficiente de transferencia de materia en el líquido**

El coeficiente de transferencia de materia se ha calculado mediante la correlación empírica siguiente (Jozef Gerhadus Maria Winkelman, 2003):

$$Sh_L = 0,178 \cdot Re_L^{0,58} \cdot Sc_L^{0,36} \quad [A.7.11]$$

Siendo  $Re_L$  el número de Reynolds del líquido,  $Sc_L$  el número de Schmidt del líquido y  $Sh_L$  el número de Sherwood del líquido. Las expresiones que permiten calcular estos números adimensionales son las siguientes:

$$Re = \frac{4 \cdot W_m}{\mu \cdot \pi \cdot D_i} \quad [A.7.12]$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot \mathcal{D}} \quad [A.7.13]$$

$$Sh = \frac{k_{la} \cdot D}{\mathcal{D}} \quad [A.7.14]$$

Siendo  $\mu$  la viscosidad del líquido,  $\rho$  la densidad del líquido,  $\mathcal{D}$  es la difusividad del formaldehído en el líquido,  $W_m$  es el caudal de líquido,  $D_i$  es el diámetro interior de la columna y  $k_{la}$  (o como se ha denominado durante todo el presente anexo,  $k_{Al}$ ) el coeficiente de transferencia de materia del formaldehído en el líquido.

La velocidad máxima para el paso de un gas a una presión aproximadamente la atmosférica por una columna de absorción se encuentra en el rango de 1ft/s-3 ft/s (Peters and Timmerhaus). Se escogerá, por tanto, una velocidad de 2 ft/s al encontrarse en un término medio. Debido a que se suele emplear una velocidad con un valor igual al 50%-70% (se empleará el valor medio del 60%) de la velocidad máxima, la velocidad del gas en nuestra columna será:

$$v = 0,6 \cdot 2 \text{ ft/s} = 1,2 \text{ ft/s} = 0,366 \text{ m/s}$$

Mediante el empleo de esta velocidad se puede calcular el diámetro interior de la columna de absorción:

$$Q = v \cdot S_{libre} = v \cdot \pi \cdot \frac{D_i^2}{4} \cdot \varepsilon \quad [A.7.15]$$

Resolviendo:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v \cdot \varepsilon}} \quad [A.7.16]$$

Siendo  $D_i$  el diámetro interno de la columna,  $Q$  el caudal volumétrico de gas,  $v$  la velocidad del gas y  $\varepsilon$  la porosidad del relleno. El caudal volumétrico del gas se puede calcular como el caudal másico entre la densidad, empleándose siempre para este cálculo el mayor caudal de gas que pasa por la columna (para que el diámetro de la columna sea adecuado en este punto, que es el más crítico). En el caso en estudio el caudal mayor de gas ocurre en la entrada de gas a la columna (es decir, en el punto inferior de ésta), sustituyendo:

$$Q = \frac{4,316 \text{ kg/s}}{1,36 \text{ kg/m}^3} = 3,1735 \text{ m}^3/\text{s}$$

El valor de la porosidad del lecho se obtiene de la **Tabla A.13.22**. Se sustituye en la **Ecuación A.7.16** y se obtiene:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,1735 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot \frac{0,366 \text{ m}}{\text{s}} \cdot 0,73}} = 3,89 \text{ m} = 12,76 \text{ ft}$$

Se normaliza este diámetro interno y se obtiene un diámetro de la columna de 3 ft (0,91 m). Se calculan a continuación los números adimensionales:

$$Re = \frac{4 \cdot 0,586 \text{ kg/s}}{5,735 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \pi \cdot 3,96 \text{ m}} = 328,37$$

$$Sc = \frac{5,735 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}}{885,75 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,093 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}} = 5,93 \cdot 10^4$$

Gracias a la **Ecuación A.7.11** se obtiene un valor del número de Sherwood:

$$Sh = 0,178 \cdot 328,37^{0,58} \cdot (5,93 \cdot 10^4)^{0,36} = 268,04$$

Mediante la **Ecuación A.7.14** se puede calcular el valor de  $k_{Ai}$ :

$$k_{Ai} = \frac{Sh \cdot \mathcal{D}}{D_i} = \frac{268,04 \cdot 1,093 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}}{3,96 \text{ m}} = 7,394 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$$

- **Módulo de Hatta**

Sustituyendo en la **Ecuación A.7.9** se obtiene finalmente el valor del módulo de Hatta en el punto superior de la columna:

$$M_H = \sqrt{\frac{0,402 \text{ m}^3/\text{kmol} \cdot \text{s} \cdot 1,093 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s} \cdot 9,52 \text{ kmol/m}^3}{7,394 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}}} = 8472,75$$

## 7.6.2. Módulo de Hatta en la parte inferior de la columna

- **Difusividad del formaldehído en el líquido**

Este parámetro ha sido calculado mediante la **Ecuación A.2.25** del **Apartado 2.5.** del **Anexo 2**. Gracias a esta ecuación empírica y a la determinación del volumen mediante el uso de la densidad molar, se obtiene como resultado:

$$\mathcal{D}_A = 1,255 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$$

- **Constante cinética**

Se sustituye en la **Ecuación A.7.10** a la temperatura de la corriente líquida (350,38 K):

$$k = 2,04 \cdot 10^5 \cdot e^{\left(\frac{-2936}{350,38}\right)} = 46,824 \text{ s}^{-1}$$

Para el cálculo del módulo de Hatta las unidades de k deben ser m<sup>3</sup>/kmol·s, por lo que se realizará el cambio a continuación mediante el uso de la densidad y los caudales del líquido:

$$k = 46,824 \text{ s}^{-1} \cdot \frac{\text{m}^3}{818,87 \text{ kg}} \cdot \frac{1,059 \text{ kg}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{s}}{45,55 \text{ mol}} \cdot \frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kmol}} = 1,329 \text{ m}^3/\text{kmol} \cdot \text{s}$$

- **Concentración de agua**

Para la determinación de la concentración de agua se ha realizado el cálculo de los moles de agua en la corriente líquida, y se ha dividido entre el volumen de líquido:

$$c_B = \left( \frac{0,241 \cdot \frac{26,216 \text{ mol}}{\text{s}}}{\frac{\text{m}^3}{818,87 \text{ kg}} \cdot \frac{1,059 \text{ kg}}{\text{s}}} \right) \cdot \frac{1 \text{ kmol}}{1000 \text{ mol}} = 4,88 \text{ kmol}/\text{m}^3$$

En este caso se ha usado 26,126 mol/s al ser necesario usar la cantidad real de agua en la corriente.

- **Coefficiente de transferencia de materia en el líquido**

Se calculan a continuación los números adimensionales mediante el uso de las **Ecuaciones A.7.12 y A.7.13**:

$$Re = \frac{4 \cdot 1,059 \text{ kg/s}}{2,354 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \pi \cdot 3,96 \text{ m}} = 1444,96$$

$$Sc = \frac{2,354 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}}{818,87 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,225 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}} = 2,29 \cdot 10^6$$

Gracias a la **Ecuación A.7.11** se obtiene un valor del número de Sherwood:

$$Sh = 0,178 \cdot 1444,96^{0,58} \cdot (2,29 \cdot 10^6)^{0,36} = 2359,17$$

Mediante la **Ecuación A.7.14** se puede calcular el valor de k<sub>Al</sub>:

$$k_{Al} = \frac{Sh \cdot \mathcal{D}}{D_i} = \frac{2359,17 \cdot 1,225 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}}{3,96 \text{ m}} = 7,47 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$$

- **Módulo de Hatta**

Sustituyendo en la **Ecuación A.7.9** se obtiene finalmente el valor del módulo de Hatta en el punto inferior de la columna:

$$M_H = \sqrt{\frac{1,329 \text{ m}^3/\text{kmol} \cdot \text{s} \cdot 1,225 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s} \cdot 4,88 \text{ kmol}/\text{m}^3}{7,47 \cdot 10^{-11} \text{ m}/\text{s}}} = 12072,72$$

Debido a que el Módulo de Hatta tanto en el punto inferior como en el superior sea mayor a 2, como cualquier punto de la columna tiene un módulo de Hatta intermedio al de los extremos, cualquier punto de la columna posee un módulo de Hatta mayor a 2. Esto significa que la reacción química es muy rápida frente a la difusión del formaldehído en el líquido en toda la columna, y por lo tanto el tipo de columna de absorción idónea es una columna de relleno (aquí se comprueba que la suposición de una columna de relleno era una hipótesis válida). Por tanto el diseño de la columna se regirá por las ecuaciones de una torre de absorción de relleno.

### 7.7. Cálculo de la altura del absorbedor

Cuando el módulo de Hatta es mayor de 2 y se usa una columna de relleno se emplea la siguiente ecuación para el cálculo de la altura de la columna:

$$h = (NUT) \cdot (HUT) = \left( \ln \frac{Y_1}{Y_2} + Y_1 - Y_2 \right) \cdot \left( \frac{G'/S}{k_{Ag} \cdot a \cdot P_T} \right) \quad [\text{A.7.17}]$$

Siendo (NUT) el número de unidades de transferencia y (HUT) la altura de la unidad de transferencia. Cada uno de esos términos se calcula mediante la expresión anterior conociendo que S es la sección de la columna,  $P_T$  la presión total a la que se opera,  $G'$  es el caudal molar de inerte en el gas,  $k_{Ag}$  es el coeficiente de transferencia de materia del formaldehído en el gas,  $a$  es el área de contacto interfacial por unidad de volumen del reactor, e  $Y_1$  e  $Y_2$  se calculan de la siguiente manera:

$$Y = \frac{y_A}{1-y_A} \quad [\text{A.7.18}]$$

Siendo  $y_A$  la composición de formaldehído en el gas es cualquier punto de reactor. Los subíndices 1 y 2 de las Y significan entrada y salida del gas respectivamente.

Se procede al cálculo de NUT:

$$y_{A1} = 0,06086$$

$$y_{A2} = \frac{0,00476 \text{ mol}/\text{s}}{136,145 \text{ mol}/\text{s}} = 3,496 \cdot 10^{-5}$$

$$Y_1 = \frac{0,06086}{1 - 0,06086} = 6,481 \cdot 10^{-2}$$

$$Y_2 = \frac{3,496 \cdot 10^{-5}}{1 - 3,496 \cdot 10^{-5}} = 3,496 \cdot 10^{-5}$$

Sustituyendo se obtiene:

$$(NUT) = \left( \ln \frac{6,481 \cdot 10^{-2}}{3,496 \cdot 10^{-5}} + 3,496 \cdot 10^{-5} - 6,481 \cdot 10^{-2} \right) = 7,590$$

Se procede al cálculo de HUT, pero antes se debe calcular los parámetros de los que depende. La sección de la columna se obtiene mediante la ecuación:

$$S = \pi \cdot \frac{D_i^2}{4} \quad [A.7.19]$$

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$S = \pi \cdot \frac{(3,96m)^2}{4} = 12,32m^2$$

El caudal de inerte en la corriente gaseosa es la corriente gaseosa de salida menos la cantidad de formaldehído que lleve (esta corriente lleva todo el oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, que son los compuestos que actúan como inertes). Se obtiene así:

$$G = 136,140 \text{ mol/s}$$

La presión total del gas es de 1,193 atm. El valor del área de contacto interfacial por unidad de volumen del reactor (a) suele tomar en columnas de absorción de relleno un valor en torno a  $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , por lo que en el presente diseño se tomará este valor.

Por último se necesita el valor de  $k_{Ag}$ , y éste se obtendrá de la siguiente correlación empírica (Jozef Gerhardus Maria Winkelman, 2003):

$$Sh_g = 0,163 \cdot Re_g^{0,7} \cdot Sc_g^{0,5} \quad [A.7.20]$$

Siendo las expresiones de los números adimensionales las mismas que las **Ecuaciones A.7.12, A.7.13 y A.7.14** pero referidas al gas. Para obtener el valor de estos números adimensionales se necesita calcular la difusividad del formaldehído en el gas (como está formado prácticamente el gas por nitrógeno y oxígeno, se considerará que el gas es aire). Para su cálculo se usa la **Ecuación A.2.27** del **Anexo 2**, y sustituyendo la temperatura de operación y los pesos moleculares del formaldehído y el aire se obtiene:

$$\mathcal{D} = 1,68 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

Se sustituye los valores en las expresiones de los números adimensionales y se obtiene (para dicho cálculo se han realizado los caudales y propiedades medias entre la entrada y salida del gas):

$$Re = \frac{4 \cdot 4085 \text{ kg/s}}{1,824 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \pi \cdot 3,96 \text{ m}} = 7,202 \cdot 10^4$$



$$Sc = \frac{1,824 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s}{1,68 \cdot 10^{-4} m^2/s \cdot 1,28 kg/m^3} = 8,5 \cdot 10^{-2}$$

Gracias a la **Ecuación A.7.20** se obtiene un valor del número de Sherwood:

$$Sh = 0,163 \cdot (7,202 \cdot 10^4)^{0,7} \cdot (8,50 \cdot 10^{-2})^{0,5} = 119,45$$

Mediante la **Ecuación A.7.14** pero refiriéndose al gas, se puede calcular el valor de  $k_{Ag}$ :

$$k_{Ag} = \frac{Sh \cdot \mathfrak{D}}{D_i} = \frac{119,45 \cdot 1,68 \cdot 10^{-4} m^2/s}{3,96 m} = 5,05 \cdot 10^{-3} m/s$$

Debido a que se tiene que usar el valor de  $k_{Ag}$  en unidades de  $mol/m^2 \cdot atm \cdot s$  para que el valor de HUT esté en m, se va a realizar el cambio de unidades (se multiplicó por la densidad molar del gas y se dividió por 1,193 atm) y se obtuvo:

$$k_{Ag} = \frac{5,05 \cdot 10^{-3} m/s \cdot 44,58 mol/m^3}{1,193 atm} = 0,189 \frac{mol}{atm \cdot m^2 \cdot s}$$

Ya obtenidos todos los parámetros, se calcula HUT:

$$HUT = \left( \frac{\frac{136,140 mol}{s} / 12,32 m^2}{0,189 \frac{mol}{m^2 \cdot atm \cdot s} \cdot 100 m^{-1} \cdot 1,193 atm} \right) = 0,491 m$$

Sustituyendo en la **Ecuación A.7.17** se obtiene la altura de la columna:

$$h = (NUT) \cdot (HUT) = 7,590 \cdot 0,491 m = 3,72 m$$

## 7.8. Diseño mecánico

Para la determinación del espesor de la columna se deben indicar con anterioridad una serie de datos:

- Margen de corrosión (C):

El Código ASME VII-Div.1 se debe tener en cuenta para diseñar las unidades de proceso que puedan estar sometidas a corrosión, erosión o abrasión mecánica un margen de corrosión, el cual predice el desgaste del espesor y así la vida útil del equipo sea la correcta. Para ello los cálculos pertinentes se deben de llevar a cabo en condiciones corroídas para garantizar la validez de estos cálculos.

Se considera un desgaste de corrosión para tuberías y depósitos de 5 milésimas de pulgada por año. Para las columnas se usan valores de vida útil de 8 años (véase la **Tabla A.13.24.**). Se calcula a continuación el valor de C:

$$C = 8 \text{ años} \cdot 0,005 \text{ in/año} = 0,04 \text{ in} = 0,1016 \text{ cm}$$

- **Espesor mínimo de pared:**  
Se debe escoger un espesor mínimo de pared, así por la fórmula de aceros inoxidables dad el Código ASME VII-Div 1:

$$t_{min} = 2,5 + C = 2,5mm + 1,016 mm = 3,516 mm$$

- **Presión y temperaturas de diseño ( $P_D$  y  $T_D$ ):**  
La presión de diseño se considera la presión de la columna más un 10% de la de operación:

$$P_D = 1,1 \cdot 1,2atm = 1,32 atm = 19,14psi$$

Debido a que esta presión de diseño es menor a 30 psi, se escoge como presión de diseño 30 psi.

La temperatura de diseño se calcula:

$$T_D = T_{maxop} + 20^{\circ}C = (350,38 K - 273 K) + 20^{\circ}C = 97,38^{\circ}C = 207,28^{\circ}F$$

- **Tensión máxima admisible (S):**  
Según se puede observar en la **Tabla A.13.10**, la tensión máxima admisible para acero Carpentier 20 Mo-6 es de 41000 psi para temperaturas que rondan los 400 K (se escoge una temperatura inmediatamente superior a la temperatura de diseño).
- **Eficiencia de soldadura (E):**  
Se observa en la tabla UW-12 del código ASME VIII-Div.1 que E toma el valor de 0,85 para una junta a tope con doble cordón u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado, y siendo examinadas las juntas por zonas.

Antes de realizar ningún cálculo se deben conocer cuáles son las tensiones a las que se encuentra sometido el equipo en estudio.

**Tabla A.7.3.**

Tensiones que influyen en el equipo (Megyesy, E.F., 2001)

Carga	Tensiones circunferenciales		Tensiones longitudinales	
	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión
<b>Peso</b>				<b>X</b>
<b>Viento</b>			<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Seísmo</b>			<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Presión interior</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	
<b>Presión exterior</b>				

Debido a que la tensión debida a seísmos es despreciable frente a la ejercida por la presión interior y a las tensiones por viento, esta tensión no se tendrá en cuenta en los cálculos, aunque al escoger el espesor normalizado de la carcasa se tendrá un sobredimensionamiento del espesor que cubrirá la tensión despreciada.

Según el Código ASME VII-Div. 1 existen dos tensiones diferentes en cuanto al cálculo del espesor debido a la presión interior: las tensiones circunferenciales y las tensiones longitudinales.

- Tensiones circunferenciales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{circ} = \frac{P_D \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_D} \quad [A.7.21]$$

Siendo:

E: eficiencia de soldadura

S: tensión máxima permisible (psi)

R: radio de la carcasa (in)

P<sub>D</sub>: presión de diseño (psi)

Sustituyendo:

$$t_{circ} = \frac{30psi \cdot 78 in}{41000psi \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 30psi} = 0,067in = 1,706mm$$

- Tensiones longitudinales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{long} = \frac{P_D \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_D} \quad [A.7.22]$$

Sustituyendo:

$$t_{long} = \frac{30psi \cdot 78 in}{2 \cdot 41000psi \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 30psi} = 0,034in = 0,853mm$$

A continuación se calcula el espesor debido a la carga por viento:

Para determinar las cargas por viento se escogen las condiciones de viento más desfavorables, encontrándose que en la zona donde se situará la planta la velocidad máxima de viento son 180 km/h. Primeramente se calculará la carga por viento, necesitándose con anterioridad la presión debida por la carga por viento:

$$P_w = q_s \cdot C_e \cdot C_q \quad [A.7.23]$$

Donde P<sub>w</sub> es la presión por carga por viento medida en lb/ft<sup>2</sup>, q<sub>s</sub> es la presión de estancamiento por viento a la altura estándar de 30 pies (medida en lb/ft<sup>2</sup>), C<sub>e</sub> es el coeficiente de la altura combinada y C<sub>q</sub> es un coeficiente denominado factor de forma. Todos estos coeficientes se obtienen de tablas.

C<sub>q</sub> para sección circular o elíptica vale 0,8 (este valor se puede observar en de la **Tabla A.13.17.**). q<sub>s</sub> vale 32,44 lb/ft<sup>2</sup> para velocidades de viento de 180 km/h (112,44 mph) (véase la

**Tabla A.13.15.**) La planta en estudio es una planta mediana, por lo que se usará una exposición a viento tipo B, y para este tipo de exposición y para alturas entre 0 y 20 pies (la altura total del recipiente se calculará a continuación y vale 17,12 ft) el valor de  $C_e$  es 0,7 (véase la **Tabla A.13.16.**). Sustituyendo en la **Ecuación A.7.23**:

$$P_w = 32,44 \text{ lb/ft}^2 \cdot 0,8 \cdot 0,7 = 18,17 \text{ lb/ft}^2$$

La expresión para calcular el momento creado por el viento es:

$$M_T = M - h_T \cdot (V - 0,5 \cdot P_w \cdot D_o \cdot h_T) \quad [\text{A.7.24}]$$

Siendo  $M_T$  el momento debido a la altura (medido en ft·lb),  $M$  es el momento máximo (expresado en ft·lb),  $h_T$  es la distancia entre el suelo y la terminación del faldón (medido en ft),  $V$  es la fuerza cortante total (expresada en lb),  $D_o$  es el diámetro exterior del recipiente considerando el espesor del aislante (expresado en ft), y  $P_w$  es la presión debida a la carga por viento (medida en lb/ft<sup>2</sup>).  $M$  y  $V$  se obtienen de las expresiones:

$$M = P_w \cdot D_o \cdot H \cdot h_1 \quad [\text{A.7.25}]$$

$$V = P_w \cdot D_o \cdot H \quad [\text{A.7.26}]$$

$$h_1 = H/2 \quad [\text{A.7.27}]$$

Siendo  $H$  la altura total del equipo y  $h_1$  la longitud del brazo de palanca, ambas expresadas en ft.

Se han escogido unos cabezales de 0,82 ft y el faldón mide 3,28 ft.  $h_T$  es equivalente a la altura del faldón, por lo tanto  $h_T = 3,28$  ft.  $H$  se calcula como la suma de los cabezales, el faldón y la altura de la columna de relleno:

$$H = 3,28 + 2 \cdot 0,82 + 12,20 = 17,12 \text{ ft}$$

A partir de aquí se calcula el valor de  $h_1 = 8,57$  ft. El valor de  $D_o$  se obtiene suponiendo un valor de espesor de aislante de 1,969 in (este valor se comprobará en el **Apartado 7.10.** del presente anexo) y que el espesor de la columna es igual a 0,15 in (este valor de espesor se comprobará a continuación en el presente apartado). Así se obtiene:

$$D_o = 2 \cdot 1,969 \text{ in} + 2 \cdot 0,15 \text{ in} + 156 \text{ in} = 159,94 \text{ in} = 13,33 \text{ ft}$$

Se sustituye en las **Ecuaciones A.7.25, A.7.26 y A.7.24**:

$$M = 18,17 \text{ lb/ft}^2 \cdot 13,33 \text{ ft} \cdot 17,12 \text{ ft} \cdot 8,57 \text{ ft} = 35552,04 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

$$V = 18,17 \text{ lb/ft}^2 \cdot 13,33 \text{ ft} \cdot 17,12 \text{ ft} = 4149,27 \text{ lb}$$

$$M_T = 35552,04 \text{ lb} \cdot \text{ft} - 3,28 \text{ ft} \cdot (4149,27 \text{ lb} - 0,5 \cdot 18,17 \text{ lb/ft}^2 \cdot 13,33 \text{ ft} \cdot 3,28 \text{ ft})$$

$$M_T = 23244,90 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

Habiendo calculado  $M_T$  ya se puede calcular el espesor de la columna necesario debido a la carga por viento:

$$t_v = \frac{12 \cdot M_T}{R^2 \cdot S \cdot E \cdot \pi} \quad [A.7.28]$$

Siendo  $t_v$  el espesor debido a la carga por viento (expresado en in), R el radio del equipo considerando el aislante (medido en in), S la tensión máxima del material (medida en psi), E es la eficiencia de la soldadura y  $M_T$  es el momento debido a la carga por viento (expresado en lb·ft). Sustituyendo los valores se obtiene:

$$t_v = \frac{12 \cdot 23244,90 \text{ lb} \cdot \text{ft}}{\left(\frac{13,33 \text{ ft} \cdot 12}{2}\right)^2 \cdot 410000 \text{ psi} \cdot 0,85 \cdot \pi} = 3,98 \cdot 10^{-4} \text{ in} = 0,010 \text{ mm}$$

Se escoge el mayor espesor entre los obtenidos anteriormente, es decir,  $t = 0,016$  in. A este valor se le suma el desgaste por corrosión:

$$t = 0,067 \text{ in} + 0,04 \text{ in} = 0,107 \text{ in} = 2,7178 \text{ mm}$$

Como este valor de espesor es menor al espesor mínimo, se usará el valor del espesor mínimo (3,516 mm o 0,138 in). Se normaliza este valor de espesor y se obtiene:

$$t = 0,15 \text{ in} = 0,381 \text{ cm} = 0,00381 \text{ m}$$

Como se puede observar, este espesor de columna es el que supusimos anteriormente, por lo que la anterior consideración fue válida.

## 7.9. Pérdidas de carga

En este apartado se calcularán las pérdidas de carga tanto del gas como del líquido.

### 7.9.1. Pérdidas de carga del gas

La pérdida de carga del gas se calcula mediante la siguiente ecuación (Peters and Timmerhaus):

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{G}{d_p \cdot g_c \cdot \rho_g} \cdot \left[ \frac{150 \cdot (1-\varepsilon) \cdot \mu_g}{d_p \cdot G} + 1,75 \right] \quad [A.7.29]$$

Siendo:

$\mu_g$ : viscosidad del gas (Pa·s).

$d_p$ : diámetro de partícula (m).

$\varepsilon$ : porosidad del lecho.

$\rho_g$ : densidad del gas (kg/m<sup>3</sup>).

G: velocidad másica del gas (kg/m<sup>2</sup>·s).

$\Delta P$ : pérdida de carga (Pa).

h: altura de la columna de absorción (m).

El diámetro de partícula se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$d_p = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{a_p} \quad [\text{A.7.30}]$$

Siendo  $a_p$  el factor de empaquetamiento ( $\text{m}^{-1}$ ). Se puede observar en la **Tabla A.13.22.** que para un relleno de anillos Raschig de 1 in  $a_p$  vale  $58 \text{ ft}^{-1}$ . Sustituyendo:

$$d_p = \frac{6 \cdot (1 - 0,73)}{58 \text{ ft}^{-1}} = 0,028 \text{ ft} = 0,0085 \text{ m}$$

Se calcula  $G$  como el caudal másico de gas entre la sección de la columna y se obtiene:

$$G = \frac{4,085 \text{ kg/s}}{12,32 \text{ m}^2} = 0,3316 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Se sustituye en la **Ecuación A.7.29** y se obtiene:

$$\Delta P = \frac{1 - 0,73}{0,73} \cdot \frac{0,3316 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}}{0,0085 \text{ m} \cdot 1,28 \text{ kg/m}^3} \left[ \frac{150 \cdot (1 - 0,73) \cdot 1,821 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}}{0,0085 \text{ m} \cdot 0,3316 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}} + 1,75 \right]$$

$$\Delta P = 245,96 \text{ Pa} = 2,427 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$$

La presión de salida del gas será por tanto:

$$\Delta P = 1,193 \text{ atm} - 2,427 \cdot 10^{-3} \text{ atm} = 1,191 \text{ atm}$$

### 7.9.2. Pérdidas de carga del líquido

Las pérdidas de carga del líquido se obtienen mediante la siguiente ecuación (Peters and Timmerhaus):

$$\frac{\Delta P}{h} = \gamma \cdot (10)^{\phi \cdot \frac{L}{\rho_L}} \cdot \frac{G}{\rho_g} \quad [\text{A.7.31}]$$

Siendo:

- h: altura de la columna de absorción (ft).
- G: velocidad másica del gas ( $\text{lb/ft}^2 \cdot \text{s}$ ).
- L: velocidad másica del líquido ( $\text{lb/ft}^2 \cdot \text{s}$ ).
- $\rho_g$ : densidad del gas ( $\text{lb/ft}^3$ ).
- $\rho_L$ : densidad del líquido ( $\text{lb/ft}^3$ ).
- $\Delta P$ : pérdida de presión del líquido ( $\text{lb}_f/\text{ft}^2$ ).
- $\gamma$  y  $\phi$ : parámetros que dependen del tipo de relleno.

Los parámetros  $\gamma$  y  $\phi$  se obtienen de la **Tabla A.13.23.**, y para anillos Raschig de 1 in poseen los valores de  $3,20 \cdot 10^{-7}$  y  $4,30 \cdot 10^{-3}$  respectivamente.

Se calcula  $L$  como el caudal másico de líquido entre la sección de la columna y se obtiene:

$$L = \frac{1,059 \text{ kg/s}}{12,32 \text{ m}^2} = 0,086 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} = 63,398 \text{ lb/ft}^2 \cdot \text{h}$$

Se cambian de unidades todos los parámetros de los que depende la **Ecuación A.7.31** y se sustituye:

$$\Delta P = 18,996 \text{ ft} \cdot 3,20 \cdot 10^{-7} \cdot \left( 10^{\left( 4,30 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{63,398 \text{ lb/ft}^2 \cdot \text{h}}{53,227 \text{ lb/ft}^3} \right)} \right) \cdot \frac{244,52 \text{ lb/ft}^2 \cdot \text{h}}{0,080 \text{ lb/ft}^3}$$

$$\Delta P = 1,882 \cdot 10^{-2} \text{ lbf/ft}^2 = 8,894 \cdot 10^{-6} \text{ atm}$$

Por lo tanto, al ser la pérdida de carga del líquido tan pequeña, la presión de salida del líquido será prácticamente la misma a la que entró, es decir, 1,2 atm.

Se suman ambas pérdidas de carga obtenidas para conocer la pérdida de carga total:

$$\Delta P_{total} = 2,427 \cdot 10^{-3} \text{ atm} + 8,894 \cdot 10^{-6} \text{ atm} = 2,427 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$$

### 7.10. Material de aislamiento

Se usará como material de aislamiento de la columna lana de roca por ser económica y cumplir los requerimientos del equipo. Mediante la **Tabla A.13.18**, se obtiene que el espesor de lana de roca necesario debe ser de 50 mm para las condiciones a las que opera la columna de absorción. Después el aislamiento de lana de roca se cubrirá con planchas de aluminio.

Este espesor se supuso en el **Apartado 7.8**, del presente anexo en la determinación del espesor debido a la carga por viento, y como se puede observar ambos valores son iguales, por lo que el espesor tomado en dicho apartado es totalmente correcto.

## ANEXO 8: Diseño del intercambiador IC-04

El intercambiador IC-04 es el que se encarga de enfriar la corriente de salida inferior del absorbedor A-01 que se dirige al mezclador con agua mediante un intercambio de calor con agua líquida.

Como se comentó en la memoria, este intercambiador será de carcasa y tubos. A continuación estarán definidos los cálculos realizados para su diseño.

### 8.1. Características de las corrientes de entrada

El fluido frío posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{ent}$ ): 298 K
- ✓ Temperatura de salida ( $T_{sal}$ ): 340 K
- ✓ Temperatura media ( $T_{med}$ ): 319 K
- ✓ Viscosidad media ( $\mu$ ):  $6,375 \cdot 10^{-4}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ): 988,22 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Conductividad térmica ( $k$ ): 0,635 W/m·K
- ✓ Número de Prandtl (Pr): 4,245
- ✓ Presión de entrada (P): 1,15 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{molar}$ ): 55,988 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 1,008 kg/s

Las propiedades se han realizado como la media aritmética de las propiedades de tal compuesto a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida.

El fluido caliente posee las siguientes propiedades:

- ✓ Temperatura de entrada ( $T_{ent}$ ): 350,38 K
- ✓ Temperatura de salida ( $T_{sal}$ ): 310 K
- ✓ Temperatura media ( $T_{med}$ ): 329,45 K
- ✓ Viscosidad media ( $\mu$ ):  $3,900 \cdot 10^{-4}$  Pa·s
- ✓ Densidad media ( $\rho$ ): 799,80 kg/m<sup>3</sup>



- ✓ Conductividad térmica (k): 0,338 W/m·K
- ✓ Número de Prandtl (Pr): 1,762
- ✓ Presión entrada (P): 1,2 atm
- ✓ Caudal molar ( $W_{\text{molar}}$ ): 45,55 mol/s
- ✓ Caudal másico (W): 1,059 kg/s

Las propiedades tomadas anteriormente (excepto las temperaturas, presión y caudales) se han tomado como la media ponderada de las propiedades de cada compuesto. Las propiedades de cada compuesto se han realizado como la media aritmética de las propiedades de tal compuesto a la temperatura de entrada y a la temperatura de salida.

Debido a que el metilenglicol no es un compuesto que se haya comprobado científicamente que exista, algunas de las propiedades se han hallado mediante las proporciones de la corriente compuesta por agua, metanol y formaldehído (aunque en la realidad estaría formada por agua, metanol y metilenglicol).

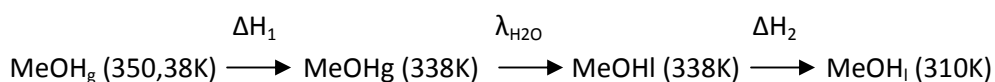
Debido a que el metanol es muy soluble en agua se supondrá que estará disuelto en todo momento en el agua líquida. Por ello, se supondrá que actúa tanto en estado líquido como en estado gas con las mismas propiedades (aunque esta suposición no es del todo válida, si se puede realizar debido a la baja proporción de metanol en la corriente y debido a que al estar soluble las propiedades se asemejarán a las de un líquido (además, las temperaturas se encuentran muy cercanas al punto de ebullición del metanol, por lo que no se cometerá mucho error al aplicarla)), es decir, que se han calculado las propiedades del metanol como las de metanol líquido.

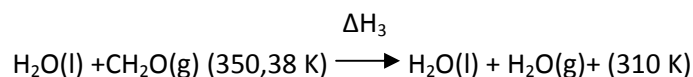
## 8.2. Asignación de flujos

Los criterios en los que se basa la asignación de flujos en el intercambiador se encuentran en el **Apartado 7.1.3.** de la **Memoria Descriptiva** del presente Proyecto Fin de Carrera. Según estos criterios la corriente caliente, al poseer formaldehído, deberá ir por los tubos al necesitar este compuesto aceros especiales (y por lo tanto más caros) para su transporte y almacenamiento.

## 8.3. Cálculo del caudal de agua necesario

Para el diseño del presente intercambiador de calor se supuso una temperatura de salida del fluido frío para poder obtener el caudal necesario de éste. Realizando un balance de energía a la corriente caliente se obtiene:





Calculándose  $\Delta H_1$ ,  $\Delta H_2$  y  $\Delta H_3$  como:

$$\Delta H = -W \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [\text{A.8.1}]$$

Siendo  $W$  el caudal del compuesto,  $c_p$  la capacidad calorífica del compuesto y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas que sufre el compuesto.  $\Delta H_3$  se calculará como la suma de todas las entalpías que proporciona cada componente.

Así se calcula el calor desprendido como:

$$Q = -(\Delta H_1 + \lambda_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta H_2 + \Delta H_3) \quad [\text{A.8.2}]$$

Aplicando las ecuaciones del **Apartado 2.1.** del **Anexo 2** se obtienen los valores de  $c_p$  medio (se obtienen estos valores como la media aritmética entre el valor a la temperatura inicial y el valor a la temperatura final):

**Tabla A.8.1.**  
Capacidades caloríficas medias de a corriente caliente

Capacidades caloríficas medias (cal/mol·K)	
$c_p(\text{MeOH})_g$	11,446
$c_p(\text{MeOH})_l$	10,957
$c_p(\text{CH}_2\text{O})$	8,727
$C_p(\text{H}_2\text{O})$	8,017

Pasando las  $c_p$  medias a Julios, y como se conocen las composiciones molares y el caudal molar de la corriente caliente y sabiendo que  $\lambda_{\text{MeOH}} = 35200 \text{ J/mol}$  se obtienen las entalpías que intervienen en el proceso:

**Tabla A.8.2.**  
Entalpías del ciclo termodinámico del fluido caliente

$\Delta H_1$	- 234,459 J/s
$\Delta H_2$	-507,636 J/s
$\Delta H_3$	-6,419·10 <sup>4</sup> J/s
$\lambda_{\text{MeOH}}$	-1,393·10 <sup>4</sup> J/s

Mediante la **Ecuación A.8.2** se obtiene:

$$Q = 7,886 \cdot 10^4 \text{ J/s}$$

Se realiza un balance de energía al fluido frío:

$$Q = W_{\text{frío}} \cdot c_{p\text{frío}} \cdot \Delta T \quad [\text{A.8.3}]$$

Siendo  $W_{frio}$  el caudal del fluido,  $c_{pfrio}$  su capacidad calorífica y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas que sufre la corriente.

Aplicando las ecuaciones del **Apartado 2.1. del Anexo 2** se obtienen los valores de  $c_p$  medio (se obtienen estos valores como la media aritmética entre el valor a la temperatura inicial y el valor a la temperatura final). Así se obtiene una  $c_{pfrio}$  igual a 8,023 cal/mol·K.

Pasando la  $c_p$  media a Julios, y como se conocen  $Q$  y la diferencia de temperaturas que sufre el fluido caliente, se puede obtener finalmente el caudal de vapor requerido:

$$W_{frio} = \frac{Q}{c_{pfrio} \cdot \Delta T} = \frac{7,886 \cdot 10^4 J/s}{33,536 J/mol \cdot K \cdot (340K - 298K)} = 55,988 mol/s = 1,008 kg/s$$

#### 8.4. Características del intercambiador

Se van a tomar las siguientes consideraciones para el diseño del intercambiador:

- Se escogerá un intercambiador de carcasa y tubos con un paso por carcasa y un paso por tubos.
- Los tubos estarán contruidos con Acero Carpenter 20 Mo-6 (es similar a la aleación Incoloy) debido a ser resistente a las atmósferas de formaldehído.
- La carcasa, al no estar en contacto con formaldehído, se construirá de Acero SA-240 (AISI 316L).
- El diámetro exterior de los tubos será de  $\frac{3}{4}$  de pulgada (0,75 in) y el diámetro interno será de 0,56 pulgadas (posteriormente se comprobará este diámetro).
- Los tubos estarán en configuración cuadrada con un pitch (o separación entre tubos) de 1 pulgada (1 in).

#### 8.5. Coeficiente global de transferencia de calor

Como se comentó en el **Apartado 3.5. del Anexo 3**, se puede definir el calor mediante la siguiente ecuación:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad [A.8.4]$$

Siendo  $U$  el coeficiente global de transferencia de calor:

$$\frac{1}{U} = \frac{D_o}{h_i \cdot D_i} + \frac{D_o \cdot \ln(r_o/r_i)}{2 \cdot k} + \frac{1}{h_o} \quad [A.8.5]$$

A continuación se calcularán los términos de la anterior ecuación

### Coeficiente individual de convección interna ( $h_i$ )

El coeficiente individual de convección interna se obtiene mediante la definición del número de Nusselt:

$$Nu_d = \frac{h_i \cdot D_i}{k} \quad [A.8.6]$$

Siendo  $h_i$  el coeficiente individual de convección interna,  $k$  la conductividad de la sustancia y  $D_i$  el diámetro interior del tubo.

Primero se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{4 \cdot W_m}{\mu \cdot \pi \cdot D_i} \quad [A.8.7]$$

Siendo  $W_m$  el caudal másico del fluido que circula por el interior de los tubos,  $\mu$  la viscosidad de este fluido y  $D_i$  el diámetro interior del tubo. Como se tienen todas las propiedades (se encuentran al inicio del presente apartado de este Anexo) se calcula el valor de este número:

$$Re = \frac{4 \cdot 1,059 \frac{kg}{s}}{3,900 \cdot 10^{-4} Pa \cdot s \cdot \pi \cdot 0,0143 m} = 2,418 \cdot 10^5$$

Como el valor del número de Reynolds es mayor a 10.000 el fluido en el interior de los tubos está en flujo turbulento. Se emplea la siguiente expresión para calcular el número de Nusselt (Mendia Urquiola, 1994):

$$Nu_d = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,3} \quad [A.8.8]$$

El exponente al que se encuentra elevado el número de Prandtl es 0,3 porque es el exponente que se usa para cuando la pared de los tubos se encuentra a menor temperatura que el fluido que circula por el interior de los tubos.

Mediante la **Ecuación A.8.8** se obtiene:

$$Nu_d = 0,023 \cdot (2,418 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 1,762^{0,3} = 552,40$$

Se usa ahora la **Ecuación A.8.6** y se obtiene el valor del coeficiente individual de convección interna:

$$h_i = \frac{Nu_d \cdot k}{D_i} = \frac{552,40 \cdot 0,338 \frac{W}{m \cdot K}}{0,0143 m} = 1,306 \cdot 10^4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

### Coeficiente individual de convección externa ( $h_o$ )

El coeficiente individual de convección externa se obtiene de la misma manera que el coeficiente individual de convección interna pero mediante las siguientes ecuaciones:

$$Nu_d = \frac{h_o \cdot D_o}{k} \quad [A.8.9]$$

$$Re = \frac{4 \cdot W_m}{\mu \cdot \pi \cdot D_0} \quad [A.8.10]$$

Como se tienen todas las propiedades (se encuentran al inicio del presente apartado de este Anexo) se calcula el valor de este número:

$$Re = \frac{4 \cdot 1,008 \text{ kg/s}}{6,375 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \pi \cdot 0,0191 \text{ m}} = 1,054 \cdot 10^5$$

Como el valor del número de Reynolds es mayor a 10.000 el fluido en el exterior de los tubos está en flujo turbulento. Se emplea la siguiente expresión para calcular el número de Nusselt (Mendia Urquiola, 1994):

$$Nu_d = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,3} \quad [A.8.11]$$

Mediante la **Ecuación A.8.11** se obtiene:

$$Nu_d = 0,023 \cdot (1,054 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 4,245^{0,3} = 370,15$$

Se usa ahora la **Ecuación A.8.9** y se obtiene el valor del coeficiente individual de convección externa:

$$h_i = \frac{Nu_d \cdot k}{D_0} = \frac{370,15 \cdot 0,635 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{0,0191 \text{ m}} = 1,23 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### Conductividad del material (k)

La conductividad del material (Acero Carpenter 20 Mo-6) se obtiene de la **Tabla A.13.10.**, e interpolando entre las temperaturas de entrada y salida de los fluidos se tiene:

$$k = 12,1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

Ya obtenidos estos parámetros se puede calcular el coeficiente global de transferencia de calor mediante la **Ecuación A.8.5** Sustituyendo los valores se obtiene:

$$U = 2427,23 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

## 8.6. Cálculo del área de intercambio de calor

Mediante la **Ecuación A.8.3** se puede obtener el área de intercambio de calor si conocemos tanto U (coeficiente global de transferencia de calor, calculado en el **Apartado 8.5.** del presente anexo), Q (calor intercambiado, calculado en el **Apartado 8.3.** del presente anexo) y  $\Delta T_{ml}$  (diferencia de temperatura media logarítmica).

Por ello se procede al cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica, que se define como:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{cale} - T_{frío_s}) - (T_{cal_s} - T_{frío_e})}{\ln\left(\frac{T_{cale} - T_{frío_s}}{T_{cal_s} - T_{frío_e}}\right)} \quad [\text{A.8.12}]$$

Mediante la sustitución de las temperaturas se obtiene:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(350,38K - 340K) - (310K - 298K)}{\ln\left(\frac{350,38K - 340K}{310K - 298K}\right)} = 10,37 K$$

Ya se puede calcular el área de intercambio de calor mediante la **Ecuación A.8.10**:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{7,886 \cdot 10^4 J/s}{2427,23 W/m^2 \cdot K \cdot 10,37K} = 3,132 m^2$$

### 8.7. Número y longitud de los tubos

La ecuación que permite el cálculo del número de los tubos es la siguiente:

$$N_{tubos} = \frac{m_f}{v \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \rho} \quad [\text{A.8.13}]$$

Siendo  $v$  la velocidad de paso del fluido por el interior de los tubos,  $\rho$  la densidad de ese fluido y  $m_f$  el caudal másico del fluido (lo que hemos denominado anteriormente como  $W$ ).

Se usa una velocidad de 1 m/s, que es una velocidad adecuada para el paso de líquidos por tubos.

Así se obtiene:

$$N_{tubos} = \frac{1,059 kg/s}{1 m/s \cdot \frac{\pi \cdot (0,0143)^2 m^2}{4} \cdot 799,8 kg/m^3} = 8,24$$

Por lo tanto se necesitan como mínimo 9 tubos, mediante la **Tabla A.13.5**. se obtiene para configuración cuadrada con un paso por tubos y un diámetro exterior de tubo de 0,75 pulgadas un número de tubos igual a 26. Con estas características se obtiene un diámetro de carcasa de 8 pulgadas (0,2032 m) y un pitch de una pulgada (0,0254 m).

Se calcula a continuación la longitud de los tubos mediante la ecuación de definición del área de un cilindro aplicada al conjunto de los tubos:

$$A_0 = \pi \cdot D_0 \cdot N \cdot L \quad [\text{A.8.14}]$$

Se sustituyen los términos y se obtiene:

$$L = \frac{A_0}{\pi \cdot D_0 \cdot N} = \frac{3,132 \text{ m}^2}{\pi \cdot 0,0191 \text{ m} \cdot 26} = 2,008 \text{ m} = 6,586 \text{ ft}$$

Por tanto, se tomará una longitud normalizada de 7 pies (2,134 m) para la longitud de los tubos.

## 8.8. Tamaño de carcasa y deflectores

Como se comentó anteriormente el diámetro de la carcasa es de 8 pulgadas (0,2032 m).

El número de deflectores se calcula mediante la ecuación:

$$N_c = \frac{L}{P_{def}} \quad [\text{A.8.15}]$$

Donde L es la longitud de los tubos y  $P_{def}$  es la distancia entre deflectores

En las normas T.E.M.A. existen un criterio para la determinación de la distancia mínima y máxima entre deflectores. Así la distancia mínima entre deflectores se define como la mayor de las distancias siguientes:

- 2 pulgadas (0,0508 m)
- 1/5 del diámetro de la carcasa (0,0406 m)

En este caso se escoge un valor de 0,508 m por ser el valor mayor.

La distancia máxima entre deflectores se determina mediante la siguiente tabla:

**Tabla A.8.3.**  
Normas T.E.M.A.: Separación máxima entre deflectores

Tube OD	Tube Materials and Temperature Limits °F (°C)	
	Carbon Steel & High Alloy Steel, 759 (399) Low Alloy Steel, 850 (454) Nickel-Copper, 600 (316) Nickel, 850 (464) Nickel-Chromium-Iron, 1000 (538)	Aluminum & Aluminum Alloys, Copper & Copper Alloys, Titanium Alloys At Code Maximum Allowable Temperature
1/4 (6.4)	26 (660)	22 (559)
3/8 (9.5)	35 (889)	30 (762)
1/2 (12.7)	44 (1118)	38 (965)
5/8 (15.9)	52 (1321)	45 (1143)
3/4 (19.1)	60 (1524)	52 (1321)
7/8 (22.2)	69 (1753)	60 (1524)
1 (25.4)	74 (1880)	64 (1626)
1-1/4 (31.8)	88 (2235)	76 (1930)
1-1/2 (38.1)	100 (2540)	87 (2210)
2 (50.8)	125 (3175)	110 (2794)

En el caso en estudio la aleación empleada es Acero Carpentier 20 Mo-6 , que es una aleación de níquel, cromo y hierro (y otros compuestos en menor proporción), y el diámetro externo de

los tubos es 0,75 pulgadas. Así se obtiene una distancia máxima entre deflectores de 60 pulgadas (1,524 m).

Para obtener la distancia entre deflectores se va a realizar la media aritmética entre los valores mínimo y máximo de distancia entre deflectores:

$$P_{def} = \frac{0,0508 \text{ m} + 1,524 \text{ m}}{2} = 0,787 \text{ m}$$

Se aproxima este valor obtenido a una distancia entre deflectores de 0,8 m.

Usando la **Ecuación A.8.15** se obtiene:

$$N_c = \frac{2,134 \text{ m}}{0,787 \text{ m}} = 2,67$$

Por lo tanto se escoge un número de placas deflectoras inmediatamente superior al valor obtenido, es decir, 3 deflectores.

Las normas T.E.M.A. establecen el espesor de los deflectores mediante la siguiente tabla:

**Tabla A.8.4.**  
Normas T.E.M.A.: Espesor de deflectores

Nominal Shell ID	Plate Thickness											
	Unsupported tube length between central baffles. End spaces between tubesheets and baffles are not a consideration.											
	12 (305) and Under		Over 12 (305) to 24 (610) Inclusive		Over 24 (610) to 36 (914) Inclusive		Over 36 (914) to 48 (1219) Inclusive		Over 48 (1219) to 60 (1524) Inclusive		Over 60 (1524)	
6 - 14 (152-356)	1/16 (1.6)		1/8 (3.2)		3/16 (4.8)		1/4 (6.4)		3/8 (9.5)		3/8 (9.5)	
15 - 28 (381-711)	1/8 (3.2)		3/16 (4.8)		1/4 (6.4)		3/8 (9.5)		3/8 (9.5)		1/2 (12.7)	
29 - 38 (737-965)	3/16 (4.8)		1/4 (6.4)		5/16 (7.5)		3/8 (9.5)		1/2 (12.7)		5/8 (15.9)	
39 - 60 (991-1524)	1/4 (6.4)		1/4 (6.4)		3/8 (9.5)		1/2 (12.7)		5/8 (15.9)		5/8 (15.9)	
61 - 100 (1549-2540)	1/4 (6.4)		3/8 (9.5)		1/2 (12.7)		5/8 (15.9)		3/4 (19.1)		3/4 (19.1)	

En el caso de estudio se tiene un diámetro de carcasa de 0,2032 m y un espaciamento entre deflectores de 31 in (0,8 m). Así se obtiene un espesor de deflectores de 0,1875 in (4,76 mm).

El diámetro de la deflectora será un poco inferior al de la carcasa, poseyendo un segmento libre correspondiente al 25% del diámetro interior de la carcasa.

## 8.9. Diseño mecánico

En el diseño mecánico se expondrán los cálculos realizados para la obtención de los espesores de tubo y de carcasa.



### 8.9.1. Espesor de tubos

Para la determinación del espesor de los tubos debido a la presión interna se empleará la expresión que permite calcularlo mediante código ASME B.31.3. Este espesor se calcula igual para toda tubería de proceso. La ecuación es la que sigue:

$$t = \left( \frac{P_D \cdot D_0}{2 \cdot (S \cdot E + P_D \cdot Y)} + C \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - M/100} \right) \quad [A.8.16]$$

Siendo:

E: eficiencia de soldadura

S: tensión máxima permisible

Y: coeficiente dependiente de la temperatura de operación y del material de los tubos

P<sub>D</sub>: presión de diseño

D<sub>0</sub>: diámetro externo de los tubos

M: margen de tolerancia de fabricación

C: margen por corrosión

Se determina a continuación cada uno de esos parámetros:

- Eficiencia de soldadura (E):  
Se observa en la tabla UW-12 del Código ASME VIII-Div.1 que E toma el valor de 1 para una junta a tope u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado por el interior y el exterior de los tubos.
- Tensión máxima admisible (S):  
Según se puede observar en la **Tabla A.13.10**, la tensión máxima admisible para Acero Carpentier 20 Mo-6 es de 41000 psi para temperaturas que rondan los 400K (se escoge una temperatura inmediatamente superior a la temperatura máxima de los fluidos).
- Factor Y:  
Como se puede observar en la **Tabla A.13.13**, para Acero Carpentier 20 Mo-6 (otros metales dúctiles) a temperaturas inferiores a 900 °F el valor del término Y es 0,4.
- Presión de diseño (P<sub>D</sub>):  
La presión de diseño se calcula como la presión a la que se opera aumentada un 10%:

$$P_D = 1,1 \cdot 1,2 atm = 1,32 atm = 19,14 psi$$

- Diámetro exterior de los tubos (D<sub>0</sub>):  
El diámetro exterior de los tubos es 0,75 in.
- Margen de tolerancia a la fabricación (M):  
Las tuberías sin costura poseen un valor alto de tolerancia a la fabricación, en el caso en estudio este margen es de un 12,5%.

- Margen de corrosión (C):

El Código ASME VII-Div.1 se debe tener en cuenta para diseñar las unidades de proceso que puedan estar sometidas a corrosión, erosión o abrasión mecánica un margen de corrosión, el cual predice el desgaste del espesor y así la vida útil del equipo sea la correcta. Para ello los cálculos pertinentes se deben de llevar a cabo en condiciones corroídas para garantizar la validez de estos cálculos.

Se considera un desgaste de corrosión para tuberías y depósitos de 5 milésimas de pulgada por año. Para los equipos principales (como es el caso) se usan vidas útiles de 15-20 años, usando aquí el valor de 15 años como vida útil del presente intercambiador. Se calcula a continuación el valor de C:

$$C = 15 \text{ años} \cdot 0,005 \text{ in/año} = 0,075 \text{ in} = 0,1905 \text{ cm}$$

Se puede ya el espesor de los tubos mediante la **Ecuación A.8.16**:

$$t = \left( \frac{19,14 \text{ psi} \cdot 0,75 \text{ in}}{2 \cdot (41000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,14 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,0859 \text{ in}$$

Se obtiene mediante la **Tabla A.13.6.** el espesor normalizado de 0,095 in que es el inmediatamente superior al espesor obtenido. Por lo tanto, los tubos serán 13 BWG (espesor 0,095 in, diámetro interior 0,56 in (0,0143 m)). Por lo tanto el diámetro interior coincide con el supuesto en el **Apartado 8.4.** del presente anexo.

### 8.9.2. Espesor de la carcasa

Para la determinación del espesor de la carcasa se deben indicar con anterioridad una serie de datos:

- Espesor mínimo de pared:  
Se debe escoger un espesor mínimo de pared tanto si se aplican las normas como los códigos. Así por la fórmula de aceros inoxidables:

$$t_{min} = 3 \text{ mm}$$

Por el Código ASME VII-Div 1:

$$t_{min} = 2,5 + C = 2,5 \text{ mm} + 1,905 \text{ mm} = 4,405 \text{ mm}$$

Se escoge de ambos el mayor espesor (4,405 mm).

- Presión y temperaturas de diseño ( $P_D$  y  $T_D$ ):  
La presión de diseño se considera la mayor de las siguientes presiones:
  - 30psi
  - Un 10% más de la de operación (en el caso en estudio 18,34 psi)

En este caso se escoge una presión de diseño de 30 psi.

La temperatura de diseño se calcula:

$$T_D = T_{maxop} + 20^\circ C = (348,9 K - 273 K) + 20^\circ C = 95^\circ C = 204,62^\circ F$$

- Tensión máxima admisible (S):  
Según se puede observar en la **Tabla A.13.9.** la tensión máxima admisible para acero SA-240 es de 20000 psi para temperaturas que rondan los 200 °F.
- Eficiencia de soldadura (E):  
Se observa en la tabla UW-12 del código ASME VIII-Div.1 que E toma el valor de 0,85 para una junta a tope con doble cordón u otro método mediante el que se obtenga la misma calidad de soldadura del material depositado, y siendo examinadas las juntas por zonas.

Antes de realizar ningún cálculo se deben conocer cuáles son las tensiones a las que se encuentra sometido el equipo en estudio.

**Tabla A.8.5.**

Tensiones que influyen en el equipo (Megyesy, E.F., 2001)

	<b>Tensiones circunferenciales</b>		<b>Tensiones longitudinales</b>	
<b>Carga</b>	<b>Tracción</b>	<b>Compresión</b>	<b>Tracción</b>	<b>Compresión</b>
<b>Peso</b>				<b>X</b>
<b>Viento</b>			<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Seísmo</b>			<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Presión interior</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	
<b>Presión exterior</b>				

Debido a que las tensiones debidas a seísmos y a viento son despreciables frente a la ejercida por la presión interior, estas tensiones no se tendrán en cuenta en los cálculos, aunque al escoger el espesor normalizado de la carcasa se tendrá un sobredimensionamiento del espesor que cubrirá las tensiones despreciadas.

Según el Código ASME VII-Div. 1 existen dos tensiones diferentes en cuanto al cálculo del espesor debido a la presión interior: las tensiones circunferenciales y las tensiones longitudinales. Así, se calcularán ambos espesores y se usará el que sea mayor.

- Tensiones circunferenciales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{circ} = \frac{P_D \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_D} \quad [A.8.17]$$

Siendo:

E: eficiencia de soldadura

S: tensión máxima permisible (psi)

R: radio de la carcasa (in)

P<sub>D</sub>: presión de diseño (psi)

Sustituyendo:

$$t_{circ} = \frac{30psi \cdot 4 in}{20000psi \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 30psi} = 0,007in = 0,179mm$$

- Tensiones longitudinales

Se usa la siguiente expresión:

$$t_{long} = \frac{P_D \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_D} \quad [A.8.18]$$

Sustituyendo:

$$t_{long} = \frac{30psi \cdot 4 in}{2 \cdot 20000psi \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 30psi} = 0,004in = 0,090mm$$

Se escoge el mayor espesor entre ambas, es decir,  $t = 0,09 in$ . A este valor se le suma el desgaste por corrosión:

$$t = 0,07in + 0,075in = 0,082 in = 2,0828 mm$$

Como este valor de espesor es menor al espesor mínimo, se usará el valor del espesor mínimo. Se normaliza este valor de espesor y se obtiene:

$$t = 0,2 in = 0,508 cm = 0,00508 m$$

## 8.10. Pérdidas de carga

En este apartado se calcularán las pérdidas de carga tanto en tubos como en carcasa.

### 8.10.1. Pérdidas de carga en tubos

La pérdida de carga en tubos se calcula mediante la ecuación de Fanning:

$$\Delta P = \frac{f \cdot G^2 \cdot L}{D_i \cdot \rho} \quad [A.8.19]$$

Siendo:

L: longitud de los tubos (m).

D<sub>i</sub>: diámetro interno de los tubos (m).

f: factor de fricción

ρ: densidad del fluido que circula por los tubos (kg/m<sup>3</sup>)

G: velocidad másica (kg/m<sup>2</sup>·s)

La velocidad másica se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G = \frac{4 \cdot M \cdot n_t}{\pi \cdot D_i^2 \cdot N_t} \quad [\text{A.8.20}]$$

Siendo:

L: longitud de los tubos (m).

$D_i$ : diámetro interno de los tubos (m).

f: factor de fricción

$\rho$ : densidad del fluido que circula por los tubos ( $\text{kg/m}^3$ )

G: velocidad másica ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

Sustituyendo en la **Ecuación A.8.20**:

$$G = \frac{4 \cdot 1,059 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,0143 \text{ m})^2 \cdot 26} = 253,61 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Para obtener el factor de fricción se necesita del uso del valor del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Así el número de Reynolds se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{G \cdot D_i}{\mu}$$

$$Re = \frac{G \cdot D_i}{\mu} = \frac{253,61 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot 0,0143 \text{ m}}{3,900 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 9,30 \cdot 10^3$$

La rugosidad relativa para el diámetro de tubo escogido y aceros comerciales es de 0,0003. Con estos datos en la gráfica de Moody se obtiene un valor de factor de fricción igual a 0,03.

Sustituyendo en la **Ecuación A.8.19**:

$$\Delta P = \frac{0,03 \cdot \left( 253,61 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \right)^2 \cdot 2,134 \text{ m}}{0,0143 \text{ m} \cdot 799,80 \text{ kg/m}^3} = 360,01 \text{ Pa} = 3,55 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$$

Por tanto, al ser la pérdida de carga tan pequeña, la presión de salida del fluido será prácticamente la misma a la que ha entrado, es decir, 1,2 atm.

### 8.10.2. Pérdidas de carga en carcasa

Las pérdidas de carga en carcasa se obtienen mediante el método de CERN:

$$\Delta P = \frac{f_c \cdot G_c^2 \cdot (N_c + 1) \cdot D_c}{D_e \cdot \rho} \quad [\text{A.8.21}]$$

Siendo:

$f_c$ : factor de fricción en carcasa.

$G_c$ : velocidad másica en carcasa ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ).

$N_c$ : número de deflectores.

$D_c$ : diámetro de la carcasa (m)

$D_e$ : diámetro equivalente (m)

La velocidad másica en carcasa se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G_c = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot (D_c^2 - N_t \cdot D_0^2) \cdot X} \quad [\text{A.8.22}]$$

Siendo M el caudal másico del fluido que circula por la carcasa y X el cociente entre el pitch y el diámetro exterior de los tubos:

$$X = \frac{\text{pitch}}{D_0} = \frac{1\text{in}}{0,75\text{in}} = 1,33$$

Sustituyendo en la **Ecuación A.8.22**:

$$G_c = \frac{4 \cdot 1,008\text{kg/s}}{\pi \cdot ((0,2032\text{m})^2 - 26 \cdot (0,0191\text{m})^2) \cdot 1,33} = 30,42 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$$

El factor de fricción necesita del cálculo del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Así, el número de Reynolds:

$$Re = \frac{G_c \cdot D_c}{\mu} = \frac{30,42 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot 0,2032\text{m}}{6,375 \cdot 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s}} = 9,69 \cdot 10^3$$

Conociendo que la rugosidad relativa para ese diámetro de carcasa y acero comerciales es de 0,00015, se obtiene del gráfico de Moody un valor de factor de fricción de 0,032.

Para disposición cuadrada la determinación del diámetro equivalente se sigue la siguiente ecuación:

$$D_e = \frac{4 \cdot \text{pitch}^2}{\pi \cdot D_0} - D_0 \quad [\text{A.8.23}]$$

$$D_e = \frac{4 \cdot (0,0254\text{m})^2}{\pi \cdot 0,0191\text{m}} - 0,0191\text{m} = 0,0239\text{m}$$

Sustituyendo en la **Ecuación A.8.21**:

$$\Delta P = \frac{0,032 \cdot \left( 30,42 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \right)^2 \cdot (3 + 1) \cdot 0,2032\text{m}}{0,0239\text{m} \cdot 988,22\text{kg}/\text{m}^3} = 1,018\text{Pa} = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{atm}$$

Por lo tanto, al ser la pérdida de carga en carcasa tan pequeña, la presión de salida del fluido que pasa por carcasa será prácticamente la misma a la que entró, es decir, 1,15 atm.

Se suman ambas pérdidas de carga obtenidas para conocer la pérdida de carga total:

$$\Delta P_{total} = 3,55 \cdot 10^{-3} \text{ atm} + 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ atm} = 3,55 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$$

### 8.11. Material de aislamiento

Se usará como material de aislamiento del intercambiador lana de roca por ser económica y cumplir los requerimientos del equipo. Mediante la **Tabla A.13.18.** se obtiene que el espesor de lana de roca necesario debe ser de 50 mm para las condiciones a las que opera el intercambiador. Después el aislamiento de lana de roca se cubrirá con planchas de aluminio.

## ANEXO 9: Diseño del mezclador M-01

Como se indica en la Memoria, se diseña el mezclador para la mezcla de la mitad de la corriente de salida inferior de la columna de absorción A-01 con agua, como el diseño de un depósito cilíndrico de disposición vertical y de fondo plano con agitación mecánica, siendo el techo del tanque de techo flotante cubierto, cuyas razones están expuestas en la **Memoria Descriptiva**.

### 9.1. Dimensiones del mezclador

El formaldehído en agua se mezcla en el presente equipo a unas condiciones de temperatura de 25 °C y a presión atmosférica.

Primeramente, se va a realizar el cálculo del volumen necesario del tanque para la mezcla del formaldehído y el agua, por lo que usará el caudal de salida del mezclador (el caudal de salida es igual a la suma de los caudales de entrada). Se va a considerar un tiempo de almacenamiento de 30 min (la mezcla no necesita demasiado tiempo para que se produzca, pero es mejor prolongar el tiempo de mezcla para evitar posibles desviaciones de la concentración deseada). Teniendo en cuenta que el caudal de salida de formaldehído es de 2777,78 kg/h, la masa a almacenar será:

$$M = 2777,78 \frac{kg}{h} \cdot 30min \cdot \frac{1h}{60min} = 1388,89 kg$$

Ahora se calcula el volumen de formaldehído al 37% a almacenar al poseer el valor de la densidad del formaldehído, 923,76 kg/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, el volumen útil del depósito se determina:

$$V_{\text{útil}} = \frac{1388,89 kg}{923,76 kg/m^3} = 1,504 m^3 = 397,23 galUS$$

Ahora se va a considerar un margen de seguridad un 10%, ya que el mezclador debe estar diseñado con un sobredimensionamiento por si ocurre alguna irregularidad o perturbación (externa o en equipos anterior en la línea de proceso). Siguiendo la norma API se construye un tanque de 440,51 galUS (1,667 m<sup>3</sup>) de capacidad, cuyas dimensiones son:

$$Diámetro = 1,280 m = 4,2 ft$$

$$Altura = 1,295 m = 4,25 ft$$

Se comprueba a continuación que el mezclador cumple el margen de seguridad indicado:

$$\% \text{ exceso} = \frac{440,51 - 397,23}{397,23} \cdot 100 = 10,90\%$$



Al cumplir con el margen de seguridad, el mezclador elegido es válido para la aplicación deseada.

## 9.2. Diseño mecánico

Para el cálculo del espesor del mezclador, se estudian las tensiones a las que está sometido dicho tanque agitado, teniendo en cuenta los esfuerzos posibles que pueden afectarle (véase **Tabla A.9.1.**). Se va a considerar sólo los esfuerzos inducidos por la carga de presión interna debido a que las tensiones debidas a seísmos y a viento son despreciables frente a la ejercida por la presión interior. Estas tensiones despreciadas no se tendrán en cuenta en los cálculos, aunque como al escoger un espesor normalizado de la carcasa se tendrá un sobredimensionamiento, cubriendo dicho espesor esas tensiones.

**Tabla A.9.1.**  
Tensiones que influyen en el equipo (Megyesy, E.F., 2001)

Carga	Tensiones circunferenciales		Tensiones longitudinales	
	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión
<b>Peso</b>				<b>X</b>
<b>Viento</b>			<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Seísmo</b>			<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Presión interior</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	
<b>Presión exterior</b>				

### Cálculo del espesor mínimo de la envolvente

Según el Código ASME VII-Div. 1 existen dos tensiones diferentes en cuanto al cálculo del espesor debido a la presión interior: las tensiones circunferenciales y las tensiones longitudinales. Así, se calcularán ambos espesores y se usará el que sea mayor.

- Tensiones circunferenciales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{circ} = \frac{P_D \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_D} \quad [A.9.1]$$

Siendo:

- E: eficiencia de soldadura
- S: tensión máxima permisible (psi)
- R: radio de la carcasa (in)
- P<sub>D</sub>: presión de diseño (psi)

Se determina a continuación cada uno de esos parámetros:

➤ Eficiencia de soldadura (E):

Para una junta a tope con doble cordón de soldadura o mediante otro método con el que se obtenga la misma calidad de soldadura de material depositado, y siendo una junta examinada por zonas, con un valor de  $E=0,85$ .

➤ Tensión máxima admisible (S):

Según se puede observar en la **Tabla A.13.10**, la tensión máxima admisible para Acero Carpenter 20 Mo-6 (Acero 316) es de 41000 psi para temperaturas menores a 300 °F (se escoge una temperatura inmediatamente superior a la temperatura máxima de los fluidos).

➤ Presión de diseño ( $P_D$ ):

La presión de diseño será la mayor de dos valores: 30 psi o 10% más de la presión de operación:

$$P_D = 1,05 \cdot 1,1 \text{ atm} = 1,155 \text{ atm} = 16,75 \text{ psi}$$

Por tanto, la presión de diseño será 30 psi.

➤ Radio del depósito (R)

El radio del depósito corresponde a 0,64 metros, es decir, 25,2 pulgadas.

➤ Desgaste de corrosión (C):

Un desgaste por corrosión de 5 milésimas de pulgada por año es satisfactorio para recipiente. La vida útil de los depósitos y similares es de 10 años (véase la **Tabla A.13.24**). Por lo tanto:

$$C = 10 \text{ años} \cdot 0,005 \frac{\text{in}}{\text{año}} = 0,05 \text{ in} = 1,27 \text{ mm}$$

Sustituyendo:

$$t_{\text{circ}} = \frac{30 \text{ psi} \cdot 25,2 \text{ in}}{41000 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 30 \text{ psi}} = 0,034 \text{ in} = 0,869 \text{ mm}$$

• Tensiones longitudinales

Se usa la siguiente expresión:

$$t_{\text{long}} = \frac{P_D \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_D} \quad [\text{A.9.2}]$$

Sustituyendo:

$$t_{\text{long}} = \frac{30 \text{ psi} \cdot 25,2 \text{ in}}{2 \cdot 41000 \text{ psi} \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 30 \text{ psi}} = 0,017 \text{ in} = 0,431 \text{ mm}$$

Se escoge el mayor espesor entre ambas, es decir,  $t = 0,034 \text{ in}$ . A este valor se le suma el desgaste por corrosión:

$$t = 0,034in + 0,075in = 0,109in = 2,77mm$$

Se comprueba que este espesor hallado es mayor que el espesor determinado por norma:

- Exigido por el Código ASME-VIII-1:

$$t_{min}(mm) = 2,5 + C = 2,5mm + 1,27mm = 3,77mm$$

$$t_{min} = 0,0038m$$

Por tanto el espesor mínimo para la envolvente será el espesor mínimo debido a que el espesor debido a las tensiones a la que está sometido el mezclador es menor al espesor mínimo, es decir, se usará un espesor de 0,038 metros. Comercialmente se tomará el inmediatamente superior. Se normaliza este valor de espesor y se obtiene:

$$t_{envolvente} = 0,15in = 3,81mm$$

Para el espesor mínimo del fondo, que es una chapa plana pegada directamente a la carcasa, es conveniente que su espesor sea coincidente con el espesor de la carcasa (es conveniente que el tanque tenga un espesor homogéneo).

$$t_{fondo} = 0,15in = 0,00381m$$

Con respecto al espesor mínimo del techo (el techo superior protege la pantalla flotante del depósito), ocurre lo mismo que con el espesor del fondo, por lo que el espesor coincidirá con el de la carcasa.

$$t_{techo} = 0,15in = 0,00381m$$

Por último, el espesor mínimo de la pantalla flotante se recoge por normas. Así, para techo flotante de acero al carbono el espesor mínimo requerido por la norma es de 0,094 pulgadas (2,5 mm), sin considerar el sobreespesor por corrosión. Se añade además el desgaste por corrosión de 0,05 pulgadas (1,27 mm), por lo que el espesor mínimo debe ser la suma de ambos:

$$t = 0,094in + 0,05in = 0,144in$$

Se toma un valor comercial inmediatamente superior al mínimo calculado. Por tanto, el espesor del techo flotante es:

$$t = 0,15in = 3,81mm$$

### 9.3. Diseño de la agitación

Para el diseño de la agitación se usarán las expresiones que se encuentran en el libro de S.M. Walas, 1988. Se pueden ver a continuación un extracto de las expresiones.

## MIXING AND AGITATION

1. Mild agitation is obtained by circulating the liquid with an impeller at superficial velocities of 0.1–0.2 ft/sec, and intense agitation at 0.7–1.0 ft/sec.
2. Intensities of agitation with impellers in baffled tanks are measured by power input, HP/1000 gal, and impeller tip speeds:

Operation	HP/1000 gal	Tip speed (ft/min)
Blending	0.2–0.5	
Homogeneous reaction	0.5–1.5	7.5–10
Reaction with heat transfer	1.5–5.0	10–15
Liquid–liquid mixtures	5	15–20
Liquid–gas mixtures	5–10	15–20
Slurries	10	

3. Proportions of a stirred tank relative to the diameter  $D$ : liquid level =  $D$ ; turbine impeller diameter =  $D/3$ ; impeller level above bottom =  $D/3$ ; impeller blade width =  $D/15$ ; four vertical baffles with width =  $D/10$ .
4. Propellers are made a maximum of 18 in., turbine impellers to 9 ft.
5. Gas bubbles sparged at the bottom of the vessel will result in mild agitation at a superficial gas velocity of 1 ft/min, severe agitation at 4 ft/min.
6. Suspension of solids with a settling velocity of 0.03 ft/sec is accomplished with either turbine or propeller impellers, but when the settling velocity is above 0.15 ft/sec intense agitation with a propeller is needed.
7. Power to drive a mixture of a gas and a liquid can be 25–50% less than the power to drive the liquid alone.
8. In-line blenders are adequate when a second or two contact time is sufficient, with power inputs of 0.1–0.2 HP/gal.

**Figura A.9.1.**

Expresiones para el cálculo de la agitación del mezclador M-01

Como se puede observar en la figura la potencia requerida para el agitador es de 5 HP (caballos de vapor, C.V.) por cada 1000 galUS. Por lo tanto se calcula la potencia requerida como:

$$P = 5 \text{ CV}/1000 \text{ galUS} \cdot 440,51 \text{ galUS} = 2,2 \text{ CV}$$

El nivel de líquido, como se puede observar, es el mismo que el diámetro del depósito (en el caso en estudio son casi iguales la altura y el diámetro, siendo ligeramente superior la altura del mezclador, por lo que es una suposición válida). El diámetro de la turbina, la altura de la turbina con respecto al fondo del tanque, la anchura de las hélices y la anchura de las cuatro placas deflectoras o “baffles” se calculan mediante las expresiones que se pueden observar en la **Figura A.9.1.**:

$$D_{\text{turbina}} = D/3 = 1,42 \text{ ft}$$

$$H_{\text{turbina}} = D/3 = 1,42 \text{ ft}$$

$$A_{hélices} = D/15 = 0,28 \text{ ft}$$

$$A_{buffles} = D/10 = 0,425 \text{ ft}$$

Se normalizan todas estas dimensiones y se obtiene un diámetro de turbina de 1,5 ft (0,457 m), una altura de la turbina con respecto al fondo de 1,5 ft (0,457 m), una anchura de las hélices de 0,3 ft (0,091 m) y una anchura de buffles de 0,45 ft (0,137 m).

## ANEXO 10: Diseño de los depósitos de almacenamiento

Como se indica en la Memoria, se diseñan depósitos cilíndricos de disposición vertical y de fondo plano, siendo el techo de los tanques de techo flotante cubiertos, cuyas razones están expuestas en la **Memoria Descriptiva**.

### 10.1. Diseño de los depósitos de formaldehído

La capacidad de los tanques se determina en función del caudal másico y la densidad del producto a almacenar, y el tiempo de almacenamiento de cada uno de ellos. La capacidad de los tanques debe ser tal que estén llenos al 50% de su capacidad total. Se diseñaran dos tanques para el almacenamiento de metanol.

#### 10.1.1. Dimensiones de los depósitos

El producto final (formaldehído al 37% en peso en agua), dispuesto ya para su comercialización, se almacena a unas condiciones de temperatura de 25 °C y a presión atmosférica.

Primeramente, se va a realizar el cálculo del volumen necesario del tanque para su almacenamiento; así se va a considerar un tiempo de almacenamiento de 7 días. Teniendo en cuenta que el caudal de salida de formaldehído es de 2777,78 kg/h, la masa a almacenar será:

$$M = 2777,78 \frac{kg}{h} \cdot 7min \cdot \frac{1h}{60min} = 4,667 \cdot 10^5 kg$$

Ahora se calcula el volumen de formaldehído al 37% a almacenar al poseer el valor de la densidad del formaldehído, 923,76 kg/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, el volumen útil del depósito se determina:

$$V_{\text{útil}} = \frac{4,667 \cdot 10^5 kg}{923,76 kg/m^3} = 505,182 m^3 = 133469,02 galUS$$

Como se indicó con anterioridad, se diseñan los tanques para que estén llenos hasta un 50%, por lo que, siguiendo la norma API, que normaliza el diseño de tanques cilíndricos, se van a colocar dos tanques de 137493,90 galUS (520,416 m<sup>3</sup>) de capacidad, cada uno cuyas dimensiones son:

$$Diámetro = 9,144 m = 30 ft$$

$$Altura = 7,92 m = 26 ft$$

Se han escogido tanques verticales, y se van a construir otros dos tanques de las mismas dimensiones por medidas de seguridad tal y como se indica en el **Capítulo 16.1.** de la **Memoria Descriptiva**.

### 10.1.2. Diseño mecánico

Para el cálculo del espesor de los depósitos de almacenamiento, se estudian las tensiones a las que están sometidos dichos tanques, teniendo en cuenta los esfuerzos posibles que pueden afectarles (véase **Tabla A.10.1.**). Se va a considerar sólo los esfuerzos inducidos por la carga de presión interna debido a que las tensiones debidas a seísmos y a viento son despreciables frente a la ejercida por la presión interior. Estas tensiones despreciadas no se tendrán en cuenta en los cálculos, aunque como al escoger un espesor normalizado de la carcasa se tendrá un sobredimensionamiento, cubriendo dicho espesor esas tensiones.

**Tabla A.10.1.**  
Tensiones que influyen en el equipo (Megyesy, E.F., 2001)

	Tensiones circunferenciales		Tensiones longitudinales	
Carga	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión
Peso				X
Viento			X	X
Seísmo			X	X
Presión interior	X		X	
Presión exterior				

#### Cálculo del espesor mínimo de la envolvente

Según el Código ASME VII-Div. 1 existen dos tensiones diferentes en cuanto al cálculo del espesor debido a la presión interior: las tensiones circunferenciales y las tensiones longitudinales. Así, se calcularán ambos espesores y se usará el que sea mayor.

- Tensiones circunferenciales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{circ} = \frac{P_D \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_D} \quad [A.10.1]$$

Siendo:

E: eficiencia de soldadura  
S: tensión máxima permisible (psi)  
R: radio de la carcasa (in)  
P<sub>D</sub>: presión de diseño (psi)

Se determina a continuación cada uno de esos parámetros:

- Eficiencia de soldadura (E):

Para una junta a tope con doble cordón de soldadura o mediante otro método con el que se obtenga la misma calidad de soldadura de material depositado, y siendo una junta examinada por zonas, con un valor de  $E=0,85$ .

- Tensión máxima admisible (S):  
Según se puede observar en la **Tabla A.13.10**, la tensión máxima admisible para Acero Carpentier 20 Mo-6 es de 41000 psi para temperaturas menores a 300 °F.
- Presión de diseño ( $P_D$ ):  
La presión de diseño será la mayor de dos valores: 30 psi o 10% más de la presión de operación:

$$P_D = 1,05 \cdot 1,1 atm = 1,155 atm = 16,75 psi$$

La presión de diseño será: 30 psi

- Radio del depósito (R)  
El radio del depósito corresponde a 4,572 metros, es decir, 180 pulgadas.
- Desgaste de corrosión (C):  
Un desgaste por corrosión de 5 milésimas de pulgada por año es satisfactorio para un recipiente. La vida útil de depósitos y similares es de 10 años (véase la **Tabla A.13.24**). Por lo tanto:

$$C = 10 \text{ años} \cdot 0,005 \frac{in}{año} = 0,05 in = 1,27 mm$$

Sustituyendo:

$$t_{circ} = \frac{30 psi \cdot 180 in}{41000 psi \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 30 psi} = 0,155 in = 3,938 mm$$

- Tensiones longitudinales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{long} = \frac{P_D \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_D} \quad [A.10.2]$$

Sustituyendo:

$$t_{long} = \frac{30 psi \cdot 180 in}{2 \cdot 41000 psi \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 30 psi} = 0,077 in = 1,968 mm$$

Se escoge el mayor espesor entre ambas, es decir,  $t = 0,155 in$ . A este valor se le suma el desgaste por corrosión:

$$t = 0,155 in + 0,075 in = 0,23 in = 5,84 mm$$

Se comprueba que este espesor hallado es mayor que el espesor determinado por norma:



- Exigido por el Código ASME-VIII-1:

$$t_{min}(mm) = 2,5 + C = 2,5 \text{ mm} + 1,27 \text{ mm} = 3,77 \text{ mm}$$

$$t_{min} = 0,0038 \text{ m}$$

Por tanto el espesor mínimo para la envolvente será el calculado, es decir, 0,00584 metros. Comercialmente se tomará el inmediatamente superior. Se normaliza este valor de espesor y se obtiene:

$$t_{envolvente} = 0,25 \text{ in} = 6,35 \text{ mm}$$

Para el espesor mínimo del fondo, que es una chapa plana pegada directamente a la carcasa, es conveniente que su espesor sea coincidente con el espesor de la carcasa (es conveniente que el tanque tenga un espesor homogéneo).

$$t_{fondo} = 0,25 \text{ in} = 0,00635 \text{ m}$$

Con respecto al espesor mínimo del techo (el techo superior protege la pantalla flotante del depósito), ocurre lo mismo que con el espesor del fondo, por lo que el espesor coincidirá con el de la carcasa.

$$t_{techo} = 0,25 \text{ in} = 0,00635 \text{ m}$$

Por último, el espesor mínimo de la pantalla flotante se recoge por normas. Así, para techo flotante de acero al carbono el espesor mínimo requerido por la norma es de 0,094 pulgadas (2,5 mm), sin considerar el sobreespesor por corrosión. Se añade además el desgaste por corrosión de 0,05 pulgadas (1,27 mm), por lo que el espesor mínimo debe ser la suma de ambos:

$$t = 0,094 \text{ in} + 0,05 \text{ in} = 0,144 \text{ in}$$

Se toma un valor comercial inmediatamente superior al mínimo calculado. Por tanto, el espesor del techo flotante es:

$$t = 0,15 \text{ in} = 3,81 \text{ mm}$$

## 10.2. Depósito “Rundown”

Antes de que el producto se almacene en los depósitos destinados a tal fin, es necesario almacenar el producto, en este caso, el formaldehído al 37%, en unos depósitos denominados Rundown, donde el producto es sometido a pruebas de control de calidad. De este modo, en caso que no se produzca formaldehído con las características deseadas, se evita mezclarlo con el resto de formaldehído, desechando la producción antes de almacenarlo.

Se elige de nuevo un tanque vertical de tipo techo flotante cubierto.

### 10.2.1. Dimensiones del depósito

El formaldehído al 37% en peso en agua se va a almacenar en este depósito a una temperatura de 25 °C y a presión atmosférica.

Primeramente, se calcula el volumen requerido del tanque para almacenar el flujo de salida de formaldehído, y debido a que en el depósito “Rundown” el producto sólo debe estar el tiempo suficiente para la realización de las pruebas y análisis, se considera un tiempo de almacenamiento de 2 días. Teniendo en cuenta que el flujo de formaldehído al 37% es de 2777,78 kg/h, la masa a almacenar será:

$$M = 2777,78 \frac{kg}{h} \cdot 2 \text{ días} \cdot 24 \frac{h}{\text{día}} = 13333,34 \text{ kg}$$

Como conocemos la densidad del formaldehído, 923,76 kg/m<sup>3</sup>, se puede determinar fácilmente el volumen útil necesario para nuestro depósito:

$$V_{\text{útil}} = \frac{13333,34 \text{ kg}}{923,76 \text{ kg/m}^3} = 14,4338 \text{ m}^3 = 38134,00 \text{ galUS}$$

Se toma ahora como margen de seguridad un 10%, ya que estos depósitos están diseñados para la realización de pruebas al producto y no como almacenamiento. Siguiendo la norma API se construye un tanque de 42305,82 galUS (160,128 m<sup>3</sup>) de capacidad, cuyas dimensiones son:

$$\text{Diámetro} = 6,096 \text{ m} = 20 \text{ ft}$$

$$\text{Altura} = 5,49 \text{ m} = 18 \text{ ft}$$

Se comprueba que el tanque elegido cumple el margen de seguridad indicado:

$$\% \text{ exceso} = \frac{42305,82 - 38134}{38134} \cdot 100 = 10,94\%$$

Como cumple dicho requisito, las dimensiones anteriormente citadas del depósito Rundown son perfectamente válidas.

### 10.2.2. Diseño mecánico

Para el cálculo del espesor del depósitos” Rundown”, se sigue el mismo procedimiento que el considerado para los depósitos de almacenamiento de formaldehído al 37% en agua. Se estudia las tensiones a las que están sometidos dichos depósitos, teniendo en cuenta los esfuerzos posibles que pueden afectar los depósitos (véase **Tabla A.10.1.**), se consideran los esfuerzos inducidos por la carga de presión interna; debido a que las tensiones debidas a sismos y a viento son despreciables frente a la ejercida por la presión interior, estas tensiones no se tendrán en cuenta en los cálculos, aunque al escoger el espesor normalizado de la carcasa se tendrá un sobredimensionamiento del espesor que cubrirá las tensiones despreciadas.

### Cálculo del espesor mínimo de la envolvente

Según el Código ASME VII-Div. 1 existen dos tensiones diferentes en cuanto al cálculo del espesor debido a la presión interior: las tensiones circunferenciales y las tensiones longitudinales. Así, se calcularán ambos espesores y se usará el que sea mayor.

- Tensiones circunferenciales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{circ} = \frac{P_D \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_D} \quad [A.10.3]$$

Siendo:

E: eficiencia de soldadura  
S: tensión máxima permisible (psi)  
R: radio de la carcasa (in)  
P<sub>D</sub>: presión de diseño (psi)

Se determina a continuación cada uno de esos parámetros:

- Eficiencia de soldadura (E):  
Para una junta a tope con doble cordón de soldadura o mediante otro método con el que se obtenga la misma calidad de soldadura de material depositado, y siendo una junta examinada por zonas, con un valor de E=0,85.
- Tensión máxima admisible (S):  
Según se puede observar en la **Tabla A.13.10**, la tensión máxima admisible para Acero Carpenter 20 Mo-6 (Acero 316) es de 41000 psi para temperaturas menores a 300 °F (se escoge una temperatura inmediatamente superior a la temperatura máxima de los fluidos).
- Presión de diseño (P<sub>D</sub>):  
La presión de diseño será la mayor de dos valores: 30 psi o 10% más de la presión de operación:  
$$P_D = 1,05 \cdot 1,1atm = 1,155atm = 16,75 psi$$
  
La presión de diseño será: 30 psi
- Radio del depósito (R)  
El radio del depósito corresponde a 3,048 metros, es decir, 120 pulgadas.
- Desgaste de corrosión (C):  
Un desgaste por corrosión de 5 milésimas de pulgada por año es satisfactorio para recipiente. La vida útil de recipientes y similares es de 10 años (véase la **Tabla A.13.24.**). Por lo tanto:

$$C = 10 \text{ años} \cdot 0,005 \frac{\text{in}}{\text{año}} = 0,05 \text{ in} = 1,27 \text{ mm}$$

Sustituyendo:

$$t_{circ} = \frac{30 \text{ psi} \cdot 120 \text{ in}}{41000 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 30 \text{ psi}} = 0,103 \text{ in} = 2,625 \text{ mm}$$

- Tensiones longitudinales  
Se usa la siguiente expresión:

$$t_{long} = \frac{P_D \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_D} \quad [\text{A.10.4}]$$

Sustituyendo:

$$t_{long} = \frac{30 \text{ psi} \cdot 120 \text{ in}}{2 \cdot 41000 \text{ psi} \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 30 \text{ psi}} = 0,052 \text{ in} = 1,312 \text{ mm}$$

Se escoge el mayor espesor entre ambas, es decir,  $t = 0,103 \text{ in}$ . A este valor se le suma el desgaste por corrosión:

$$t = 0,103 \text{ in} + 0,075 \text{ in} = 0,178 \text{ in} = 4,53 \text{ mm}$$

Se comprueba que este espesor hallado es mayor que el espesor determinado por norma:

- Exigido por el Código ASME-VIII-1:

$$t_{min}(\text{mm}) = 2,5 + C = 2,5 \text{ mm} + 1,27 \text{ mm} = 3,77 \text{ mm}$$

$$t_{min} = 0,0038 \text{ m}$$

Por tanto el espesor mínimo para la envolvente será el calculado, es decir, 0,00453 metros. Comercialmente se tomará el inmediatamente superior. Se normaliza este valor de espesor y se obtiene:

$$t_{envolvente} = 0,20 \text{ in} = 5,08 \text{ mm}$$

Para el espesor mínimo del fondo, que es una chapa plana pegada directamente a la carcasa, es conveniente que su espesor sea coincidente con el espesor de la carcasa (es conveniente que el tanque tenga un espesor homogéneo).

$$t_{fondo} = 0,20 \text{ in} = 0,00508 \text{ m}$$

Con respecto al espesor mínimo del techo (el techo superior protege la pantalla flotante del depósito), ocurre lo mismo que con el espesor del fondo, por lo que el espesor coincidirá con el de la carcasa.

$$t_{techo} = 0,20 \text{ in} = 0,00508 \text{ m}$$

Por último, el espesor mínimo de la pantalla flotante se recoge por normas. Así, para techo flotante de acero al carbono el espesor mínimo requerido por la norma es de 0,094 pulgadas

(2,5 mm), sin considerar el sobreespesor por corrosión. Se añade además el desgaste por corrosión de 0,05 pulgadas (1,27 mm), por lo que el espesor mínimo debe ser la suma de ambos:

$$t = 0,094 \text{ in} + 0,05 \text{ in} = 0,144 \text{ in}$$

Se toma un valor comercial inmediatamente superior al mínimo calculado. Por tanto, el espesor del techo flotante es:

$$t = 0,15 \text{ in} = 3,81 \text{ mm}$$

### 10.3. Cubeto de retención

Por cuestiones de seguridad, se dispondrán los tanques de formaldehído en un cubeto de retención con capacidad suficiente para guardar el producto en caso de rotura de alguno de los tanques. Así, en caso de accidente, las consecuencias de las lesiones y daños materiales se reducirán en gran cuantía.

En el **Plano nº 8** se muestra la disposición de estos tanques. A continuación se determinan las dimensiones del cubeto de retención que contendrá los cinco depósitos de formaldehído. El cubeto tiene forma rectangular por lo que el área será:

$$A_{\text{cubeto}} = a \cdot b$$

Para determinar la longitud de los lados de cubeto, se debe tener en cuenta que la distancia entre los depósitos y la pared del cubeto se fija en 8 metros, puesto que según especificaciones de CEPESA debe haber una distancia mínima de al menos la altura del tanque más alto, y que la distancia entre depósitos, debe ser al menos el diámetro del depósito de mayor diámetro, por lo que tomaremos una distancia de 9,2 metros entre cada uno de ellos.

Por tanto, según esto:

$$a = 9,144 \cdot 2 + 9,2 + 8 \cdot 2 = 43,49 \text{ m}$$

$$b = 8 \cdot 2 + 9,2 \cdot 2 + 9,144 \cdot 2 + 6,096 = 58,78 \text{ m}$$

Por lo tanto el área del cubeto es:

$$A_{\text{cubeto}} = a \cdot b = 43,49 \cdot 58,78 = 2556,40 \text{ m}^2$$

Para determinar la altura del cubeto, se tendrá en cuenta el volumen que el cubeto debe tener para poder almacenar los líquidos en caso de rotura de los depósitos y el área anteriormente calculada.

$$V_{\text{cubeto}} = A_{\text{cubeto}} \cdot h \quad \text{[A.10.5]}$$

El volumen mínimo será el volumen total del mayor de los tanques que contiene. En este caso, los tanques de mayor capacidad son los de almacenamiento del producto, puesto que el depósito “Rundown” es más pequeño que el resto, por lo tanto, el cubeto tendrá un volumen total de 520,416 m<sup>3</sup>.

$$V_{cubeto} = 520,416 \text{ m}^3$$

Se sobredimensiona en un 10%, por lo que el volumen total necesario será:

$$V_{cubeto} = 572,46 \text{ m}^3$$

Despejando de la **Ecuación A.10.5**:

$$h = \frac{V_{cubeto}}{A_{cubeto}} = \frac{572,46 \text{ m}^3}{2556,40 \text{ m}^2} = 0,22 \text{ m}$$

La altura mínima que debe tener el cubeto es de 0,22 metros. Según especificaciones los cubetos deben tener una altura mínima de 0,75 metros, por lo que el cubeto en el que se instalen los depósitos de metanol, tendrá una altura de 0,75 metros.

## ANEXO 11: Diseño de la red de tuberías

Es este anexo se van a diseñar las conducciones que intervienen en el proceso, determinando el diámetro y espesor de éstas y la pérdida de carga asociada a la circulación del fluido por ellas. No se van a diseñar las conducciones auxiliares del proceso por no ser el objetivo del presente Proyecto Fin de Carrera.

Para el diseño de las tuberías primero se calcula la sección de ésta mediante la ecuación:

$$Q = v \cdot S \quad [A.11.1]$$

Siendo Q el caudal volumétrico del fluido (en m<sup>3</sup>/s), v la velocidad media del fluido en la conducción (en m/s), y S la sección de la tubería (en m<sup>2</sup>).

El caudal volumétrico se calcula como el caudal másico de fluido por la densidad de éste. La velocidad del fluido se puede determinar gracias a las **Tablas A.13.11. y A.13.12.**

La sección depende del diámetro interno de la tubería, y transformando la ecuación se puede determinar el diámetro interno teórico de la conducción mediante la expresión:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} \quad [A.11.2]$$

Mediante el diámetro teórico interno, se puede dilucidar cuál es el diámetro externo de la conducción mediante la **Tabla A.13.7.** Se escoge el diámetro externo inmediatamente superior al diámetro interno obtenido.

Gracias al diámetro externo se puede calcular el espesor real de los tubos mediante la ecuación dada por el código ASME B.31.3:

$$t = \left( \frac{P_D \cdot D_0}{2 \cdot (S \cdot E + P_D \cdot Y)} + C \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - M/100} \right) \quad [A.11.3]$$

Donde:

E: eficiencia de soldadura

S: tensión máxima permisible

Y: coeficiente dependiente de la temperatura de operación y del material de los tubos

P<sub>D</sub>: presión de diseño

D<sub>0</sub>: diámetro externo de los tubos

M: margen de tolerancia de fabricación

C: margen por corrosión

Se determina a continuación cada uno de esos parámetros:

- Eficiencia de soldadura (E):  
Se observa en la tabla UW-12 del Código ASME VIII-Div.1 que E toma el valor de 1 para tuberías sin costura.
- Tensión máxima admisible (S):  
La tensión máxima admisible depende tanto del material de diseño como de la temperatura de operación. Para Acero SA-240 véase la **Tabla A.13.9.** y para Acero Carpenter 20 Mo-6 véase la **Tabla A.13.10.** La temperatura de diseño se calcula como 20 °C mayor a la de operación.
- Factor Y:  
Las tuberías que se van a diseñar no poseen temperaturas de diseño superiores a 900 °F, y todas van a tener como material de diseño o de Acero SA-240 o Acero Carpenter 20 Mo-6, por lo que, como se puede observar en la **Tabla A.13.13.**, el factor Y para todas las conducciones será de 0,4.
- Presión de diseño ( $P_D$ ):  
La presión de diseño se calcula como la presión a la que se opera aumentada un 10%.
- Margen de tolerancia a la fabricación (M):  
Las tuberías sin costura poseen un valor alto de tolerancia a la fabricación, en el caso en estudio este margen es de un 12,5% para todas las tuberías.
- Margen de corrosión (C):  
Se considera un desgaste de corrosión para tuberías y depósitos de 5 milésimas de pulgada por año. Para las tuberías se usan vidas útiles de 15 años (véase la **Tabla A.13.24.**) Se calcula a continuación el valor de C:

$$C = 15 \text{ años} \cdot 0,005 \text{ in/año} = 0,075 \text{ in} = 0,1905 \text{ cm}$$

Obtenido el espesor de la conducción, se escogerá un espesor normalizado inmediatamente superior al obtenido mediante la **Tabla A.13.7.** El diámetro interno real será el correspondiente al diámetro exterior que se obtuvo anteriormente y al espesor normalizado elegido.

Después de esto, se calculará la velocidad real del fluido por dentro de las tuberías mediante la expresión:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_i^2} \quad [\text{A.11.4}]$$

A continuación se determinan las pérdidas de carga en las conducciones mediante la expresión de Darcy-Weisbach para circulación de líquidos:



$$h_f = (4f) \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad [\text{A.11.5}]$$

Donde:

- $h_f$  es la pérdida de carga en metros.
- $4f$  es el factor de fricción de Darcy (adimensional).
- $L$  es la longitud de la tubería en m.
- $D$  es el diámetro interior de la tubería en m.
- $v$  es la velocidad del fluido expresada en m/s.
- $g$  es la aceleración de la gravedad que vale  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

El factor de Darcy,  $4f$ , se estima a través del gráfico de Moody (**Figura A.13.1. del Anexo 13**) en función del número de Reynolds,  $Re$ , y la rugosidad relativa,  $\varepsilon/D$ . La rugosidad relativa se determina mediante la **Figura A.13.2. del Anexo 13**, a partir del diámetro de la tubería  $D$  y el material de la tubería por la cual circula el fluido.

En cuanto al número de Reynolds, se calcula mediante:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad [\text{A.11.6}]$$

Siendo:

- $\mu$  la viscosidad del fluido en Pa·s.
- $\rho$  la densidad del fluido expresado en  $\text{kg/m}^3$ .
- $v$  la velocidad del fluido en m/s.
- $D$  el diámetro interior de la conducción en m.

La densidad y la viscosidad del fluido se obtienen de las ecuaciones del **Anexo 2**, la velocidad del fluido se calculó anteriormente por la **Ecuación A.11.4.** y el diámetro se calculo con antelación mediante el espesor de la tubería.

Para la determinación de la longitud de la tubería para la determinación de las pérdidas de carga hay que tener en cuenta dos términos: la longitud de la tubería en sí y la longitud equivalente de los accesorios. La longitud equivalente se refiere a la longitud de tubería recta de igual diámetro que el accesorio que produciría una pérdida de carga igual a la del accesorio, de modo que se considera el accesorio como si fuera un tramo de tubería. Los valores de longitudes equivalentes de los accesorios se pueden obtener de la **Tabla A.13.20.**

La longitud de la tubería en sí se obtiene de la consideración de la distancia mínima entre equipos y la distribución de la planta (véase **Apartado 6.2.** de la **Memoria Descriptiva**). Así se calculará como la suma de los tramos entre equipo y equipo más las dimensiones de los equipos.

En el caso de las pérdidas de carga en las tuberías en las que circulan gases se usa la siguiente expresión para transporte de gases en condiciones isotérmicas (se supone que la circulación es isotérmica debido a la eficiencia del aislamiento térmico que recubre las conducciones):

$$P_2 = P_1 \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{4f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot R \cdot T}\right)} \quad [\text{A.11.7}]$$

Siendo:

$P_1$ : presión de entrada en la tubería (atm).

$P_2$ : presión de salida en la tubería (atm).

$4f$ : factor de fricción.

$L$ : longitud de la tubería (m).

$v$ : velocidad del fluido a la entrada (m/s).

$D$ : diámetro interno de la tubería (m)

$R$ : constante de los gases ideales ( $\text{m}^2/\text{s}^2\text{K}$ ).

$T$ : temperatura de circulación del fluido (K).

La longitud  $L$  y el factor de fricción de Darcy  $4f$  se calculan mediante el mismo procedimiento explicado anteriormente para los líquidos. El diámetro se calculó anteriormente y la velocidad fue obtenida mediante la **Ecuación A.11.4**. El resto de variables se obtuvieron en los balances de materia y energía al proceso y a los equipos.

Siguiendo esta sistemática de cálculo, se va a calcular a continuación las características de cada tubería.

#### Conducción C-01:

La conducción C-01 es la encargada de transportar el metanol de los depósitos que lo almacenan hasta el intercambiador IC-01, donde se mezclará con aire y aumentará su temperatura.

El caudal de líquido que debe transportar es 0,317 kg/s, con una densidad del fluido de 797,60 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un líquido el fluido que circula por esta conducción, la velocidad media de circulación es 5 ft/s (1,524 m/s, véase la **Tabla A.13.12**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,317 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 1,524 \text{ m/s} \cdot 797,60 \text{ kg/m}^3}} = 0,018 \text{ m} = 0,717 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7**, se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 1,050 in (0,027 m).

La presión de operación es de 1,15 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,265 atm (18,343 psi). Al no contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero inoxidable SA-240. Para este material a temperaturas menores a 300°F (la temperatura de operación son 25°C, por lo tanto la de diseño es 45°C, 113°F) la tensión máxima admisible es de 20000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{18,343 \text{ psi} \cdot 1,050 \text{ in}}{2 \cdot (20000 \text{ psi} \cdot 1 + 18,343 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,086 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 1,050 in es de 0,113 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 0,824 in (0,021 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 0,317 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,021 \text{ m})^2 \cdot 797,60 \text{ kg/m}^3} = 1,155 \text{ m/s}$$

La viscosidad del fluido es de  $4,90 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ . Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{797,60 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,155 \text{ m/s} \cdot 0,021 \text{ m}}{4,90 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 3,935 \cdot 10^4$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,021 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,0025. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de 4f igual a 0,028.

Se calcula la longitud de la tubería (la tubería comienza en el depósito, que debe salvar la distancia mínima entre él y el reactor, el diámetro del reactor, la distancia entre el reactor y el intercambiador IC-02, el diámetro de intercambiador IC-02, y la distancia entre el intercambiador IC-02 y el intercambiador IC-01):

$$L_{\text{tubería}} = 20 \text{ m} + 1 \text{ m} + 2,5 \text{ m} + 0,3 \text{ m} + 1,5 \text{ m} = 25,3 \text{ m}$$

La conducción poseerá un codo largo de  $90^\circ$ , cuya longitud equivalente es de 1,75 ft (0,53 m).

Se calculan las pérdidas de carga en la conducción:

$$h_f = 0,028 \cdot \frac{25,3 \text{ m} + 0,53 \text{ m}}{0,021 \text{ m}} \cdot \frac{(1,155 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 2,28 \text{ m}$$

### Conducción C-02:

La conducción C-02 es la encargada de transportar el aire atmosférico que impulsa el ventilador V-03 hasta el intercambiador IC-01, donde se mezclará con el metanol y aumentará su temperatura.

El caudal de gas que debe transportar es 4 kg/s, con una densidad del fluido de  $0,97 \text{ kg/m}^3$ . Al ser un gas el fluido que circula por esta conducción, la velocidad media de circulación es 95 ft/s (28,963 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 4kg/s}{\pi \cdot 28,963m/s \cdot 0,97kg/m^3}} = 0,426m = 16,758in$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 18 in (0,457 m).

La presión de operación es de 1,15 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,265 atm (18,343 psi). Al no contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero inoxidable SA-240. Para este material a temperaturas menores a 300°F (la temperatura de operación son 25°C, por lo tanto la de diseño es 45°C, 113°F) la tensión máxima admisible es de 20000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{18,343psi \cdot 18in}{2 \cdot (20000psi \cdot 1 + 18,343psi \cdot 0,4)} + 0,075in \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,095 in$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 18 in es de 0,250 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 17,5 in (0,445 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 4kg/s}{\pi \cdot (0,445m)^2 \cdot 0,97kg/m^3} = 26,560 m/s$$

La viscosidad del fluido es de  $1,97 \cdot 10^{-5}$  Pa·s. Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{0,97kg/m^3 \cdot 26,560m/s \cdot 0,445m}{1,97 \cdot 10^{-5}Pa \cdot s} = 5,803 \cdot 10^5$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,445 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,00013. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de 4f igual a 0,0145.

Se calcula la longitud de la tubería (la tubería comienza en el ventilador V-03 y debe salvar la distancia entre él y el intercambiador IC-01):

$$L_{tubería} = 3m$$

La conducción no poseerá accesorios. Mediante la **Ecuación A.11.7.** se calcula la presión de salida de la tubería:

$$P_2 = 1,15 atm \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{0,0145 \cdot 3m \cdot (26,560m/s)^2}{0,445m \cdot 286,690 \frac{m^2}{s^2 \cdot K} \cdot 298K}\right)} = 1,15 atm$$

### Conducción C-03:

La conducción C-03 es la encargada de transportar el caudal de salida frío del intercambiador IC-01 hasta el intercambiador IC-02, donde aumentará su temperatura.

El caudal de gas que debe transportar es 4,317 kg/s, con una densidad del fluido de 0,73 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un gas el fluido que circula por esta conducción, la velocidad media de circulación es 95 ft/s (28,963 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,317kg/s}{\pi \cdot 28,963m/s \cdot 0,73kg/m^3}} = 0,510m = 20,068 in$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se debería escoger un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, pero al ser tan parecido a 20 in, se escoge este diámetro, es decir, un diámetro exterior de 20 in (0,508 m).

La presión de operación es de 1,15 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,265 atm (18,343 psi). Al no contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero inoxidable SA-240. Para este material a temperaturas menores a 600°F (la temperatura de operación son 271,07°C, por lo tanto la de diseño es 291,07°C, 556,07°F) la tensión máxima admisible es de 17000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{18,343psi \cdot 20in}{2 \cdot (17000psi \cdot 1 + 18,343psi \cdot 0,4)} + 0,075in \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,098 in$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 20 in es de 0,250 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 19,5 in (0,495 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 4,317kg/s}{\pi \cdot (0,495m)^2 \cdot 0,73kg/m^3} = 30,677 m/s$$

La viscosidad del fluido es de  $2,62 \cdot 10^{-5}$  Pa·s. Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{0,73 \text{ kg/m}^3 \cdot 30,677 \text{ m/s} \cdot 0,495 \text{ m}}{2,62 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 4,236 \cdot 10^5$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,495 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,00013. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de  $4f$  igual a 0,015.

Se calcula la longitud de la tubería (la tubería comienza en el intercambiador IC-01 y debe salvar la distancia entre él y el intercambiador IC-02):

$$L_{\text{tubería}} = 1,5 \text{ m}$$

La conducción poseerá dos codos largos de  $90^\circ$ , cuya longitud equivalente es de 34 ft (al ser dos la longitud equivalente es de 68 ft (20,73m)). Mediante la **Ecuación A.11.7.** se calcula la presión de salida del fluido:

$$P_2 = 1,15 \text{ atm} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{0,015 \cdot 22,23 \text{ m} \cdot (30,667 \text{ m/s})^2}{0,495 \text{ m} \cdot 286,690 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K}} \cdot 544,07 \text{ K}}\right)} = 1,145 \text{ atm}$$

#### Conducción C-04:

La conducción C-04 es la encargada de transportar el caudal de salida del intercambiador IC-02 hasta el ventilador V-01, donde aumentará su presión.

El caudal de gas que debe transportar es 4,317 kg/s, con una densidad del fluido de  $0,73 \text{ kg/m}^3$ . Al ser un gas el fluido que circula por esta conducción, la velocidad media de circulación es 95 ft/s (28,963 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,317 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 28,963 \text{ m/s} \cdot 0,73 \text{ kg/m}^3}} = 0,510 \text{ m} = 20,068 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se debería escoger un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, pero al ser tan parecido a 20 in, se escoge este diámetro, es decir, un diámetro exterior de 20 in (0,508 m).

La presión de operación es de 1,145 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,2595 atm (18,263 psi). Al no contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero inoxidable SA-240. Para este material a temperaturas menores a  $600^\circ\text{F}$  (la temperatura de operación son  $271,07^\circ\text{C}$ , por lo tanto la de diseño es  $291,07^\circ\text{C}$ ,  $556,07^\circ\text{F}$ ) la tensión máxima admisible es de 17000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{18,151 \text{ psi} \cdot 20 \text{ in}}{2 \cdot (16600 \text{ psi} \cdot 1 + 18,151 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,098 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 20 in es de 0,250 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 19,5 in (0,495 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 4,317 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,495 \text{ m})^2 \cdot 0,73 \text{ kg/m}^3} = 30,677 \text{ m/s}$$

La viscosidad del fluido es de  $2,70 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ . Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{0,73 \text{ kg/m}^3 \cdot 30,677 \text{ m/s} \cdot 0,495 \text{ m}}{2,70 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 4,105 \cdot 10^5$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,495 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,00013. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de 4f igual a 0,015.

Se calcula la longitud de la tubería (la tubería comienza en el intercambiador IC-02 y debe salvar la distancia entre él y el intercambiador IC-01, el diámetro de este intercambiador, la distancia horizontal entre éste intercambiador y el ventilador V-01 y la distancia vertical entre este intercambiador y el ventilador V-01):

$$L_{\text{tubería}} = 1,5 \text{ m} + 1 \text{ m} + 3 \text{ m} + 2 \text{ m} = 7,5 \text{ m}$$

La conducción poseerá dos codos largos de  $90^\circ$ , cuya longitud equivalente es de 34 ft (al ser dos la longitud equivalente es de 68 ft (20,73m)). Mediante la **Ecuación A.11.7.** se calcula la presión de salida del fluido:

$$P_2 = 1,145 \text{ atm} \cdot \sqrt{\left( 1 - \frac{0,015 \cdot 28,23 \text{ m} \cdot (30,667 \text{ m/s})^2}{0,495 \text{ m} \cdot 286,690 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K}} \cdot 570 \text{ K}} \right)} = 1,142 \text{ atm}$$

### Conducción C-05:

La conducción C-05 es la encargada de transportar el caudal de salida del ventilador V-01 hasta el reactor R-01, donde se producirá la reacción química.

El caudal de gas que debe transportar es 4,317 kg/s, con una densidad del fluido de 0,73 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un gas el fluido que circula por esta conducción, la velocidad media de circulación es 95 ft/s (28,963 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,317 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 28,963 \text{ m/s} \cdot 0,73 \text{ g/m}^3}} = 0,510 \text{ m} = 20,068 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se debería escoger un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, pero al ser tan parecido a 20 in, se escoge este diámetro, es decir, un diámetro exterior de 20 in (0,508 m).

La presión de operación es de 1,25 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,375 atm (19,938 psi). Al no contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero inoxidable SA-240. Para este material a temperaturas de 650°F (la temperatura de operación son 297°C, por lo tanto la de diseño es 317°C, 602,6°F) la tensión máxima admisible es de 16600 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,938 \text{ psi} \cdot 20 \text{ in}}{2 \cdot (16600 \text{ psi} \cdot 1 + 19,938 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,099 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 20 in es de 0,250 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 19,5 in (0,495 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 4,317 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,495 \text{ m})^2 \cdot 0,73 \text{ kg/m}^3} = 30,667 \text{ m/s}$$

La viscosidad del fluido es de  $2,70 \cdot 10^{-5}$  Pa·s. Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{0,73 \text{ kg/m}^3 \cdot 30,667 \text{ m/s} \cdot 0,495 \text{ m}}{2,70 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 4,105 \cdot 10^5$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,495 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,00013. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de 4f igual a 0,015.

Se calcula la longitud de la tubería (la tubería comienza en el ventilador V-01 y debe salvar la distancia horizontal entre él y el intercambiador IC-01, el diámetro de este intercambiador, la distancia entre éste intercambiador y el intercambiador IC-02, el diámetro de este intercambiador y la distancia entre este último intercambiador y el reactor R-01):

$$L_{\text{tubería}} = 3 \text{ m} + 0,3 \text{ m} + 1,5 \text{ m} + 1 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 8,3 \text{ m}$$



La conducción no poseerá accesorios. Mediante la **Ecuación A.11.7.** se calcula la presión de salida del fluido:

$$P_2 = 1,25 atm \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{0,015 \cdot 8,30m \cdot (30,677m/s)^2}{0,495m \cdot 286,690 \frac{m^2}{s^2 \cdot K} \cdot 570K}\right)} = 1,25 atm$$

#### Conducción C-06:

La conducción C-06 es la encargada de transportar el caudal de salida del reactor R-01 hasta el ventilador V-02, donde aumentará su presión.

El caudal de gas que debe transportar es 4,316 kg/s, con una densidad del fluido de 0,86 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un gas el fluido que circula por esta conducción, la velocidad media de circulación es 95 ft/s (28,963 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,316kg/s}{\pi \cdot 28,963m/s \cdot 0,86kg/m^3}} = 0,470m = 18,487 in$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 20 in (0,508 m).

La presión de operación es de 1,080 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,188 atm (17,226 psi). Al contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero Carpenter 20 Mo-6. Para este material a temperaturas de 316 °C (la temperatura de operación son 297 °C, por lo tanto la de diseño es 317 °C) la tensión máxima admisible es de 31000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{17,226psi \cdot 20in}{2 \cdot (31000psi \cdot 1 + 17,226psi \cdot 0,4)} + 0,075in \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,092 in$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 20 in es de 0,250 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 19,5 in (0,495 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 4,316kg/s}{\pi \cdot (0,495m)^2 \cdot 0,86kg/m^3} = 26,034 m/s$$

La viscosidad del fluido es de  $2,70 \cdot 10^{-5}$  Pa·s. Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{0,86kg/m^3 \cdot 26,034m/s \cdot 0,495m}{2,70 \cdot 10^{-5}Pa \cdot s} = 4,10 \cdot 10^5$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,495 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,00013. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de  $4f$  igual a 0,015.

Se calcula la longitud de la tubería (la tubería comienza en el reactor R-01 y debe salvar la distancia horizontal entre él y el intercambiador IC-02, el diámetro de este intercambiador, la distancia entre éste intercambiador y el intercambiador IC-01, el diámetro de este intercambiador, la distancia horizontal (en el plano) entre este último intercambiador y el ventilador V-02, y la distancia vertical entre el ventilador V-02 y la línea de la tubería):

$$L_{tubería} = 2,5m + 0,3m + 1,5m + 1 + 3m + 2m = 10,3m$$

La conducción poseerá un codo largo de  $90^\circ$ , cuya longitud equivalente es de 34 ft (10,36 m). Mediante la **Ecuación A.11.7.** se calcula la presión de salida del fluido:

$$P_2 = 1,080atm \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{0,015 \cdot 20,66m \cdot (26,034m/s)^2}{0,495m \cdot 286,690 \frac{m^2}{s^2 \cdot K} \cdot 570K}\right)} = 1,079 atm$$

#### Conducción C-07:

La conducción C-07 es la encargada de transportar el caudal de impulsión del ventilador V-02 hasta el intercambiador IC-01, donde se enfriará.

El caudal de gas que debe transportar es 4,316 kg/s, con una densidad del fluido de 0,86 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un gas el fluido que circula por esta conducción, la velocidad media de circulación es 95 ft/s (28,963 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,316kg/s}{\pi \cdot 28,963m/s \cdot 0,86kg/m^3}} = 0,470m = 18,487 in$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 20 in (0,508 m).

La presión de operación es de 1,2 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,140 psi). Al contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero Carpenter 20 Mo-6. Para este material a

temperaturas de 316°C (la temperatura de operación son 297°C, por lo tanto la de diseño es 317°C) la tensión máxima admisible es de 31000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,140 \text{ psi} \cdot 20 \text{ in}}{2 \cdot (31000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,140 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,093 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 20 in es de 0,250 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 19,5 in (0,495 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 4,316 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,495 \text{ m})^2 \cdot 0,86/\text{m}^3} = 26,034 \text{ m/s}$$

La viscosidad del fluido es de  $2,70 \cdot 10^{-5}$  Pa·s. Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{0,86 \text{ kg/m}^3 \cdot 26,034 \text{ m/s} \cdot 0,495 \text{ m}}{2,70 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 4,10 \cdot 10^5$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,495 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,00013. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de 4f igual a 0,015.

Se calcula la longitud de la tubería (la tubería comienza en el ventilador V-02 y debe salvar la distancia horizontal (en el plano) entre él y el intercambiador IC-01, la distancia vertical (en el plano) entre el ventilador V-02 y el ventilador V-01, y la distancia vertical entre el ventilador V-01 y el ventilador V-03):

$$L_{\text{tubería}} = 3 \text{ m} + 2 \text{ m} + 2 \text{ m} = 7 \text{ m}$$

La conducción poseerá dos codos largos de 90°, cuya longitud equivalente es de 34 ft (10,36 m cada uno, por lo que la longitud equivalente será de 20,73 m). Mediante la **Ecuación A.11.7**. se calcula la presión de salida del fluido:

$$P_2 = 1,2 \text{ atm} \cdot \sqrt{\left( 1 - \frac{0,015 \cdot 27,73 \text{ m} \cdot (26,034 \text{ m/s})^2}{0,495 \text{ m} \cdot 286,690 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K}} \cdot 570 \text{ K}} \right)} = 1,199 \text{ atm}$$

### Conducción C-08:

La conducción C-08 es la encargada de transportar el caudal de salida del intercambiador IC-01 hasta el intercambiador IC-03, donde disminuirá aún más su temperatura.

El caudal de gas que debe transportar es 4,316 kg/s, con una densidad del fluido de 1,09 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un gas el fluido que circula por esta conducción, la velocidad media de circulación es 95 ft/s (28,963 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,316 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 28,963 \text{ m/s} \cdot 1,09 \text{ kg/m}^3}} = 0,417 \text{ m} = 16,421 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 18 in (0,457 m).

La presión de operación es de 1,199 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,124 psi). Al contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero Carpenter 20 Mo-6. Para este material a temperaturas menores a 204°C (la temperatura de operación son 67°C, por lo tanto la de diseño es 87°C) la tensión máxima admisible es de 41000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,124 \text{ psi} \cdot 18 \text{ in}}{2 \cdot (41000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,124 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,091 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 18 in es de 0,2520 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 17,5 in (0,445 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 4,316 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,445 \text{ m})^2 \cdot 1,09 \text{ kg/m}^3} = 25,503 \text{ m/s}$$

La viscosidad del fluido es de 1,86 · 10<sup>-5</sup> Pa·s. Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{1,09 \text{ kg/m}^3 \cdot 25,503 \text{ m/s} \cdot 0,445 \text{ m}}{1,86 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 6,64 \cdot 10^5$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,445 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,00013. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de 4f igual a 0,015.

Se calcula la longitud de la tubería (la tubería comienza en el intercambiador IC-01 y debe salvar la distancia horizontal (en el plano) entre él y el intercambiador IC-03 (la mitad de la distancia mínima) y la distancia vertical entre ambos intercambiadores):

$$L_{\text{tubería}} = 1,5 \text{ m} + 1,5 \text{ m}/2 = 2,25 \text{ m}$$

La conducción poseerá un codo largo de 90°, cuya longitud equivalente es de 30 ft (9,14 m). Mediante la **Ecuación A.11.7.** se calcula la presión de salida del fluido:

$$P_2 = 1,199 atm \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{0,015 \cdot 11,39m \cdot (25,503/s)^2}{0,445m \cdot 286,690 \frac{m^2}{s^2 \cdot K} \cdot 350K}\right)} = 1,198 atm$$

### Conducción C-09:

La conducción C-09 es la encargada de transportar el caudal de salida del intercambiador IC-03 hasta el absorbedor A-01, donde el formaldehído se convertirá en metilenglicol en contacto con el agua.

El caudal de gas que debe transportar es 4,316 kg/s, con una densidad del fluido de 1,22 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un gas el fluido que circula por esta conducción, la velocidad media de circulación es 95 ft/s (28,963 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,316kg/s}{\pi \cdot 28,963m/s \cdot 1,22kg/m^3}} = 0,394m = 15,522 in$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 16 in (0,407 m).

La presión de operación es de 1,199 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,124 psi). Al contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero Carpenter 20 Mo-6. Para este material a temperaturas menores a 204°C (la temperatura de operación son 37°C, por lo tanto la de diseño es 57°C) la tensión máxima admisible es de 41000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,124psi \cdot 16in}{2 \cdot (41000psi \cdot 1 + 19,124psi \cdot 0,4)} + 0,075in \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,090 in$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 16 in es de 0,250 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 15,5 in (0,394 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 4,316kg/s}{\pi \cdot (0,394m)^2 \cdot 1,22kg/m^3} = 29,045 m/s$$

La viscosidad del fluido es de  $1,65 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{1,22 \text{ kg/m}^3 \cdot 29,045 \text{ m/s} \cdot 0,394 \text{ m}}{1,65 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}} = 8,46 \cdot 10^5$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,394 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,00012. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de  $4f$  igual a 0,014.

Se calcula la longitud de la tubería (la tubería comienza en el intercambiador IC-03 y debe salvar la distancia vertical (en el plano) de la zona de paso de camiones (10 m), la distancia, el diámetro del intercambiador IC-04, y la distancia entre éste y el absorbedor A-01):

$$L_{\text{tubería}} = 10 \text{ m} + 0,8 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 12,8 \text{ m}$$

La conducción poseerá dos codos largos de  $90^\circ$  cuya longitud equivalente es de 27 ft (8,23 m, por lo que en total la longitud equivalente de los codos será de 16,46 m).

La conducción no poseerá accesorios. Mediante la **Ecuación A.11.7.** se calcula la presión de salida del fluido:

$$P_2 = 1,198 \text{ atm} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{0,014 \cdot 29,76 \text{ m} \cdot (29,045 \text{ m/s})^2}{0,394 \text{ m} \cdot 286,690 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K}} \cdot 310 \text{ K}}\right)} = 1,193 \text{ atm}$$

### Conducción C-10:

La conducción C-10 es la encargada de transportar el caudal de líquido de salida del absorbedor A-01 hasta el intercambiador IC-04, donde se enfriará.

El caudal de fluido que debe transportar es 1,059 kg/s, con una densidad del fluido de 799,80 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un líquido el fluido que circula por esta conducción, la velocidad media de circulación es 5 ft/s (1,524 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,059 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 1,524 \text{ m/s} \cdot 799,80 \text{ kg/m}^3}} = 0,033 \text{ m} = 1,309 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 1,660 in (0,042 m).

La presión de operación es de 1,20 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,140 psi). Al contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero Carpenter 20 Mo-6. Para este material a temperaturas menores a 204°C (la temperatura de operación son 67°C, por lo tanto la de diseño es 87°C) la tensión máxima admisible es de 41000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,140 \text{ psi} \cdot 4 \text{ in}}{2 \cdot (41000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,140 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,086 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 1,660 in es de 0,100 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 1,460 in (0,037 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 1,059 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,037 \text{ m})^2 \cdot 799,80 \text{ kg/m}^3} = 1,225 \text{ m/s}$$

La viscosidad del fluido es de  $3,26 \cdot 10^{-4}$  Pa·s. Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{799,80 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,225 \text{ m/s} \cdot 0,037 \text{ m}}{3,26 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 1,12 \cdot 10^5$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,037 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,001. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de  $4f$  igual a 0,022.

Se calcula la longitud de la tubería (la conducción comienza en el absorbedor A-01 y debe salvar la distancia entre éste y el intercambiador IC-04):

$$L_{\text{tubería}} = 3 \text{ m}$$

La conducción no poseerá accesorios. Mediante la **Ecuación A.11.5.** se calculan las pérdidas de carga en la conducción, sustituyendo se obtiene:

$$h_f = 0,022 \cdot \frac{3 \text{ m}}{0,037 \text{ m}} \cdot \frac{(1,225 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,14 \text{ m}$$

### Conducción C-11:

La conducción C-11 es la encargada de transportar el caudal de líquido de salida del intercambiador IC-04 hasta la bifurcación donde la corriente se separará en dos.

El caudal de fluido que debe transportar es 1,059 kg/s, con una densidad del fluido de 799,80 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un líquido el fluido que circula por esta conducción, la velocidad media de circulación es 5 ft/s (1,524 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,059 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 1,524 \text{ m/s} \cdot 799,80 \text{ kg/m}^3}} = 0,033 \text{ m} = 1,309 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 1,660 in (0,042 m).

La presión de operación es de 1,20 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,140 psi). Al contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero Carpenter 20 Mo-6. Para este material a temperaturas menores a 204°C (la temperatura de operación son 37°C, por lo tanto la de diseño es 57°C) la tensión máxima admisible es de 41000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,140 \text{ psi} \cdot 4 \text{ in}}{2 \cdot (41000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,140 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,086 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 1,660 in es de 0,100 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 1,460 in (0,037 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 1,059 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,037 \text{ m})^2 \cdot 799,80 \text{ kg/m}^3} = 1,225 \text{ m/s}$$

La viscosidad del fluido es de  $5,08 \cdot 10^{-4}$  Pa·s. Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{799,80 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,225 \text{ m/s} \cdot 0,037 \text{ m}}{5,08 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 7,16 \cdot 10^4$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,037 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,001. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de 4f igual a 0,023.

Se calcula la longitud de la tubería (la conducción comienza en el intercambiador IC-01 y la bifurcación se encuentra a la mitad de la distancia entre el intercambiador y las bombas):

$$L_{\text{tubería}} = \frac{3 \text{ m}}{2} = 1,5 \text{ m}$$



La conducción poseerá accesorios una T al final de ésta, cuya longitud equivalente es de 10 ft (3,05 m). Mediante la **Ecuación A.11.5.** se calculan las pérdidas de carga en la conducción, sustituyendo se obtiene:

$$h_f = 0,023 \cdot \frac{1,5m + 3,05m}{0,037m} \cdot \frac{(1,225m/s)^2}{2 \cdot 9,81m/s^2} = 0,22m$$

### Conducción C-12:

La conducción C-12 es la encargada de transportar el caudal de una boca de la bifurcación hacia la bomba B-01, donde ésta le aportará altura neta de impulsión.

El caudal de fluido que debe transportar es 0,530 kg/s, con una densidad del fluido de 799,80 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un líquido el fluido que circula por esta conducción, y estar en las aspiración de una bomba, la velocidad media de circulación es 3 ft/s (0,915 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.:**

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,530kg/s}{\pi \cdot 0,915m/s \cdot 799,80kg/m^3}} = 0,030m = 1,195 in$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 1,315 in (0,033 m).

La presión de operación es de 1,20 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,140 psi). Al contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero Carpenter 20 Mo-6. Para este material a temperaturas menores a 204°C (la temperatura de operación son 37°C, por lo tanto la de diseño es 57°C) la tensión máxima admisible es de 41000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,140psi \cdot 4in}{2 \cdot (41000psi \cdot 1 + 19,140psi \cdot 0,4)} + 0,075in \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,086 in$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 1,315 in es de 0,109 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 1,097 in (0,028 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 0,530kg/s}{\pi \cdot (0,028m)^2 \cdot 799,80kg/m^3} = 1,086 m/s$$

La viscosidad del fluido es de  $5,08 \cdot 10^{-4}$  Pa·s. Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{799,80 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,086 \text{ m/s} \cdot 0,028 \text{ m}}{5,08 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 4,77 \cdot 10^4$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,028 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,0018. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de  $4f$  igual a 0,024.

Se calcula la longitud de la tubería (la conducción comienza en la bifurcación y debe salvar la distancia entre ésta y la bomba B-01 (que es la mitad de la distancia entre el intercambiador IC-04 y la bomba):

$$L_{\text{tubería}} = \frac{3 \text{ m}}{2} = 1,5 \text{ m}$$

La conducción poseerá un codo largo de  $90^\circ$  cuya longitud equivalente es de 1,75 ft (0,53m). Mediante la **Ecuación A.11.5.** se calculan las pérdidas de carga en la conducción, sustituyendo se obtiene:

$$h_f = 0,024 \cdot \frac{1,5 \text{ m} + 0,53 \text{ m}}{0,028 \text{ m}} \cdot \frac{(1,086 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,11 \text{ m}$$

### Conducción C-13:

La conducción C-13 es la encargada de transportar el caudal de la bomba B-01 hasta el punto de mezcla con el agua.

El caudal de fluido que debe transportar es 0,530 kg/s, con una densidad del fluido de 799,80 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un líquido el fluido que circula por esta conducción la velocidad media de circulación es 5 ft/s (1,524 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,530 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 1,524 \text{ m/s} \cdot 799,80 \text{ kg/m}^3}} = 0,024 \text{ m} = 0,926 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 1,315 in (0,033 m).

La presión de operación es de 1,20 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,140 psi). Al contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero Carpenter 20 Mo-6. Para este material a temperaturas menores a 204°C (la temperatura de operación son 37°C, por lo tanto la de diseño es 5 °C) la tensión máxima admisible es de 41000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,140 \text{ psi} \cdot 4 \text{ in}}{2 \cdot (41000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,140 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,086 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 1,315 in es de 0,109 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 1,097 in (0,028 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 0,530 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,028 \text{ m})^2 \cdot 799,80 \text{ kg/m}^3} = 1,086 \text{ m/s}$$

La viscosidad del fluido es de  $5,08 \cdot 10^{-4}$  Pa·s. Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{799,80 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,086 \text{ m/s} \cdot 0,028 \text{ m}}{5,08 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 4,77 \cdot 10^4$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,028 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,0018. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de  $4f$  igual a 0,024.

Se calcula la longitud de la tubería (la conducción comienza en la bomba B-01 y debe salvar la distancia entre ésta y el intercambiador IC-04, el diámetro de éste y la distancia entre el intercambiador y el absorbedor (el punto de mezcla se va a encontrar a la altura de la columna de absorción)):

$$L_{\text{tubería}} = 3 \text{ m} + 0,3 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 5,8 \text{ m}$$

La conducción poseerá un codo largo de  $90^\circ$  cuya longitud equivalente es de 1,75 ft (0,53m) y una T cuya longitud equivalente es 5,5 ft (1,676 m). Mediante la **Ecuación A.11.5.** se calculan las pérdidas de carga en la conducción, sustituyendo se obtiene:

$$h_f = 0,024 \cdot \frac{5,8 \text{ m} + 0,53 \text{ m} + 1,676 \text{ m}}{0,028 \text{ m}} \cdot \frac{(1,086 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,41 \text{ m}$$

#### Conducción C-14:

La conducción C-14 es la encargada de transportar el caudal de agua de mezcla, por lo que no se calcularán las pérdidas de carga de esta corriente.

El caudal de fluido que debe transportar es 0,056 kg/s, con una densidad del fluido de 993,04 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un líquido el fluido que circula por esta conducción la velocidad media de circulación es 5 ft/s (1,524 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,056 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 1,524 \text{ m/s} \cdot 993,04 \text{ kg/m}^3}} = 0,007 \text{ m} = 0,270 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 0,540 in (0,014 m).

La presión de operación es de 1,20 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,140 psi). Al no contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero SA-240. Para este material a temperaturas menores a 300°F (la temperatura de operación son 37°C, por lo tanto la de diseño es 5 °C, 134,6°F) la tensión máxima admisible es de 20000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,140 \text{ psi} \cdot 4 \text{ in}}{2 \cdot (20000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,140 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,086 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 0,540 in es de 0,088 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 0,364 in (0,009 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 0,056 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,009 \text{ m})^2 \cdot 993,04 \text{ kg/m}^3} = 0,840 \text{ m/s}$$

### Conducción C-15:

La conducción C-15 es la encargada de transportar el caudal del punto de mezcla con el agua hasta el absorbedor A-01, donde este caudal “atrapará” al formaldehído.

El caudal de fluido que debe transportar es 0,586 kg/s, con una densidad del fluido de 884,75 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un líquido el fluido que circula por esta conducción la velocidad media de circulación es 5 ft/s (1,524 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.:**

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,586 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 1,524 \text{ m/s} \cdot 884,75 \text{ kg/m}^3}} = 0,024 \text{ m} = 0,926 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 1,315 in (0,033 m).

La presión de operación es de 1,20 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,140 psi). Al contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero Carpenter 20 Mo-6. Para este material a temperaturas menores a 204°C (la temperatura de operación son 37°C, por lo tanto la de diseño es 57°C) la tensión máxima admisible es de 41000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,140 \text{ psi} \cdot 4 \text{ in}}{2 \cdot (41000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,140 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,086 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 1,315 in es de 0,109 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 1,097 in (0,028 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 0,586 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,028 \text{ m})^2 \cdot 884,75 \text{ kg/m}^3} = 1,086 \text{ m/s}$$

La viscosidad del fluido es de  $5,74 \cdot 10^{-4}$  Pa·s. Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{884,75 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,086 \text{ m/s} \cdot 0,028 \text{ m}}{5,74 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 4,67 \cdot 10^4$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,028 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,0018. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de  $4f$  igual a 0,024.

Se calcula la longitud de la tubería (la conducción comienza en el punto de mezcla y debe salvar la distancia entre la base de la columna de absorción A-01 y alcanzar la altura máxima de esta columna):

$$L_{\text{tubería}} = 3,72 \text{ m}$$

La conducción no poseerá accesorios. Mediante la **Ecuación A.11.5.** se calculan las pérdidas de carga en la conducción, sustituyendo se obtiene:

$$h_f = 0,024 \cdot \frac{3,72 \text{ m}}{0,028 \text{ m}} \cdot \frac{(1,086 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,19 \text{ m}$$

### Conducción C-16:

La conducción C-16 es la encargada de transportar el caudal de la otra de las bocas de la bifurcación hasta la bomba B-02, la cual le aportará altura neta de impulsión.

El caudal de fluido que debe transportar es 0,530 kg/s, con una densidad del fluido de 799,80 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un líquido el fluido que circula por esta conducción, y estar en las aspiración de una bomba, la velocidad media de circulación es 3 ft/s (0,915 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,530 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 0,915 \text{ m/s} \cdot 799,80 \text{ kg/m}^3}} = 0,030 \text{ m} = 1,195 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 1,315 in (0,033 m).

La presión de operación es de 1,20 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,140 psi). Al contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero Carpenter 20 Mo-6. Para este material a temperaturas menores a 204°C (la temperatura de operación son 37°C, por lo tanto la de diseño es 57°C) la tensión máxima admisible es de 41000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,140 \text{ psi} \cdot 4 \text{ in}}{2 \cdot (41000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,140 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,086 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 1,315 in es de 0,109 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 1,097 in (0,028 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 0,530 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,028 \text{ m})^2 \cdot 799,80 \text{ kg/m}^3} = 1,086 \text{ m/s}$$

La viscosidad del fluido es de 5,08 · 10<sup>-4</sup> Pa·s. Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{799,80 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,086 \text{ m/s} \cdot 0,028 \text{ m}}{5,08 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 4,77 \cdot 10^4$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,028 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,0018. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de 4f igual a 0,024.

Se calcula la longitud de la tubería (la conducción comienza en la bifurcación y debe salvar la distancia entre ésta y la bomba B-02 (que es la mitad de la distancia entre el intercambiador IC-04 y la bomba):

$$L_{tubería} = \frac{3m}{2} = 1,5m$$

La conducción poseerá un codo largo de 90° cuya longitud equivalente es de 1,75 ft (0,53m). Mediante la **Ecuación A.11.5.** se calculan las pérdidas de carga en la conducción, sustituyendo se obtiene:

$$h_f = 0,024 \cdot \frac{1,5m + 0,53m}{0,028m} \cdot \frac{(1,086m/s)^2}{2 \cdot 9,81m/s^2} = 0,11m$$

### Conducción C-17:

La conducción C-17 es la encargada de transportar el caudal de la bomba B-02 hasta el mezclador M-01.

El caudal de fluido que debe transportar es 0,530 kg/s, con una densidad del fluido de 799,80 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un líquido el fluido que circula por esta conducción la velocidad media de circulación es 5 ft/s (1,524 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,530kg/s}{\pi \cdot 1,524m/s \cdot 799,80kg/m^3}} = 0,024m = 0,926 in$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 1,315 in (0,033 m).

La presión de operación es de 1,20 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,140 psi). Al contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero Carpenter 20 Mo-6. Para este material a temperaturas menores a 204°C (la temperatura de operación son 37°C, por lo tanto la de diseño es 57°C) la tensión máxima admisible es de 41000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,140psi \cdot 4in}{2 \cdot (41000psi \cdot 1 + 19,140psi \cdot 0,4)} + 0,075in \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,086 in$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 1,315 in es de 0,109 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 1,097 in (0,028 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 0,530kg/s}{\pi \cdot (0,028m)^2 \cdot 799,80kg/m^3} = 1,086 m/s$$

La viscosidad del fluido es de  $5,08 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{799,80 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,086 \text{ m/s} \cdot 0,028 \text{ m}}{5,08 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}} = 4,77 \cdot 10^4$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,028 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,0018. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de  $4f$  igual a 0,024.

Se calcula la longitud de la tubería (la conducción comienza en la bomba B-02 y debe salvar la distancia entre ésta y el intercambiador IC-04, y la distancia entre el intercambiador y el mezclador):

$$L_{\text{tubería}} = 3 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 5,5 \text{ m}$$

La conducción poseerá un codo largo de  $90^\circ$  cuya longitud equivalente es de 1,75 ft (0,53m). Mediante la **Ecuación A.11.5**, se calculan las pérdidas de carga en la conducción, sustituyendo se obtiene:

$$h_f = 0,024 \cdot \frac{5,5 \text{ m} + 0,53 \text{ m}}{0,028 \text{ m}} \cdot \frac{(1,086 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,31 \text{ m}$$

### Conducción C-18:

La conducción C-18 es la encargada de transportar el caudal de agua de mezcla al mezclador M-01, por lo que no se calcularán las pérdidas de carga de esta corriente.

El caudal de fluido que debe transportar es 0,258 kg/s, con una densidad del fluido de 993,04 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un líquido el fluido que circula por esta conducción la velocidad media de circulación es 5 ft/s (1,524 m/s, véase la **Tabla A.13.12**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,258 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 1,524 \text{ m/s} \cdot 993,04 \text{ kg/m}^3}} = 0,015 \text{ m} = 0,580 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7**, se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 0,840 in (0,021 m).

La presión de operación es de 1,20 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,140 psi). Al no contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero SA-240. Para este material a temperaturas menores a 300°F (la temperatura de operación son 37°C, por lo tanto la de diseño es 57°C, 134,6°F) la tensión máxima admisible es de 20000 psi.



Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,140 \text{ psi} \cdot 4 \text{ in}}{2 \cdot (20000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,140 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,086 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 0,540 in es de 0,109 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 0,622 in (0,016 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 0,258 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,016 \text{ m})^2 \cdot 993,04 \text{ kg/m}^3} = 1,325 \text{ m/s}$$

### Conducción C-19:

La conducción C-19 es la encargada de transportar el caudal de la bomba B-03 (que aspira del mezclador M-01) hasta el depósito Rundown.

El caudal de fluido que debe transportar es 0,788 kg/s, con una densidad del fluido de 923,76 kg/m<sup>3</sup>. Al ser un líquido el fluido que circula por esta conducción la velocidad media de circulación es 5 ft/s (1,524 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,788 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 1,524 \text{ m/s} \cdot 923,76 \text{ kg/m}^3}} = 0,027 \text{ m} = 1,051 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 1,315 in (0,033 m).

La presión de operación es de 1,20 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,140 psi). Al contener el fluido que circula por esta conducción formaldehído, el material de la tubería será de acero Carpenter 20 Mo-6. Para este material a temperaturas menores a 204°C (la temperatura de operación son 37°C, por lo tanto la de diseño es 57°C) la tensión máxima admisible es de 41000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,140 \text{ psi} \cdot 4 \text{ in}}{2 \cdot (41000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,140 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,086 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 1,315 in es de 0,109 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 1,097 in (0,028 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 0,788 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,028 \text{ m})^2 \cdot 923,76 \text{ kg/m}^3} = 1,398 \text{ m/s}$$

La viscosidad del fluido es de  $5,08 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ . Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{923,76 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,398 \text{ m/s} \cdot 0,028 \text{ m}}{5,08 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 7,09 \cdot 10^4$$

Sabiendo que el diámetro interno de la tubería es de 0,028 m y el material es un acero comercial, se obtiene una rugosidad relativa de 0,0018. Mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene un valor de  $4f$  igual a 0,026.

Se calcula la longitud de la tubería (la conducción comienza en la bomba B-03 y debe salvar la distancia vertical (en el plano) entre dicha bomba y la bomba B-02, y la distancia entre la bomba B-02 y la bomba B-01, la anchura del paso para camiones (10 m), la distancia entre los ventiladores (2 m en cada caso, por lo tanto 6 m), la distancia horizontal (en el plano) entre las bombas y el intercambiador IC-01, el diámetro del intercambiador, la distancia entre el intercambiador IC-01 y el intercambiador IC-02, el diámetro de este último intercambiador, la distancia entre el intercambiador y el reactor R-01, el diámetro del reactor, y la distancia entre el reactor R-01 y los depósitos (20 m)):

$$L_{\text{tubería}} = 2\text{m} + 2\text{m} + 10\text{m} + 6\text{m} + 3\text{m} + 0,3\text{m} + 1,5\text{m} + 0,3\text{m} + 2,5\text{m} + 0,3\text{m} + 20\text{m}$$

$$L_{\text{tubería}} = 48,6\text{m}$$

La conducción poseerá dos codos largos de  $90^\circ$  cuya longitud equivalente es de 1,75 ft (0,53m). Mediante la **Ecuación A.11.5.** se calculan las pérdidas de carga en la conducción, sustituyendo se obtiene:

$$h_f = 0,026 \cdot \frac{48,6\text{m} + 0,53\text{m} + 0,53\text{m}}{0,028\text{m}} \cdot \frac{(1,086\text{m/s})^2}{2 \cdot 9,81\text{m/s}^2} = 4,62\text{m}$$

### Conducción C-20:

La conducción C-20 es la encargada de transportar los gases de salida de la columna de absorción A-01 a la antorcha para su posterior combustión. Por ello, no se calcularán las pérdidas de carga en esta conducción.

El caudal de fluido que debe transportar es 3,859 kg/s, con una densidad del fluido de  $41,77 \text{ kg/m}^3$ . Al ser un gas el fluido que circula por esta conducción, la velocidad media de circulación es 95 ft/s (28,963 m/s, véase la **Tabla A.13.12.**).

Sustituyendo en la **Ecuación A.11.2.**:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,859 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 28,963 \text{ m/s} \cdot 41,77 \text{ kg/m}^3}} = 0,064 \text{ m} = 2,508 \text{ in}$$

Mediante la **Tabla A.13.7.** se escoge un diámetro exterior inmediatamente superior al diámetro interior obtenido, es decir, un diámetro exterior de 2,875 in (0,073 m).

La presión de operación es de 1,2 atm, por lo que la presión de diseño (que es un 10% mayor) será de 1,32 atm (19,140 psi). Al no contener el fluido que circula por esta conducción prácticamente formaldehído, el material de la tubería será de acero inoxidable SA-240. Para este material a temperaturas menores a 300°F (la temperatura de operación son 25°C, por lo tanto la de diseño es 45°C, 113°F) la tensión máxima admisible es de 20000 psi.

Se calcula el espesor de la conducción necesario:

$$t = \left( \frac{19,140 \text{ psi} \cdot 3,500 \text{ in}}{2 \cdot (20000 \text{ psi} \cdot 1 + 19,140 \text{ psi} \cdot 0,4)} + 0,075 \text{ in} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - 12,5/100} \right) = 0,087 \text{ in}$$

El espesor normalizado inmediatamente superior para tuberías de diámetro externo de 2,875 in es de 0,120 in. El diámetro interno de estas tuberías es de 2,635 in (0,067 m).

Se calcula la velocidad real del fluido por la tubería:

$$v = \frac{4 \cdot 3,859 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,067 \text{ m})^2 \cdot 41,77 \text{ kg/m}^3} = 26,246 \text{ m/s}$$

## ANEXO 12: Diseño de los elementos de impulsión

Durante el proceso se necesitarán impulsar tanto líquidos como gases; para impulsar los primeros se usarán bombas, y para la impulsión de los gases se usarán soplantes de baja presión (su comportamiento es similar al de los ventiladores de alta presión).

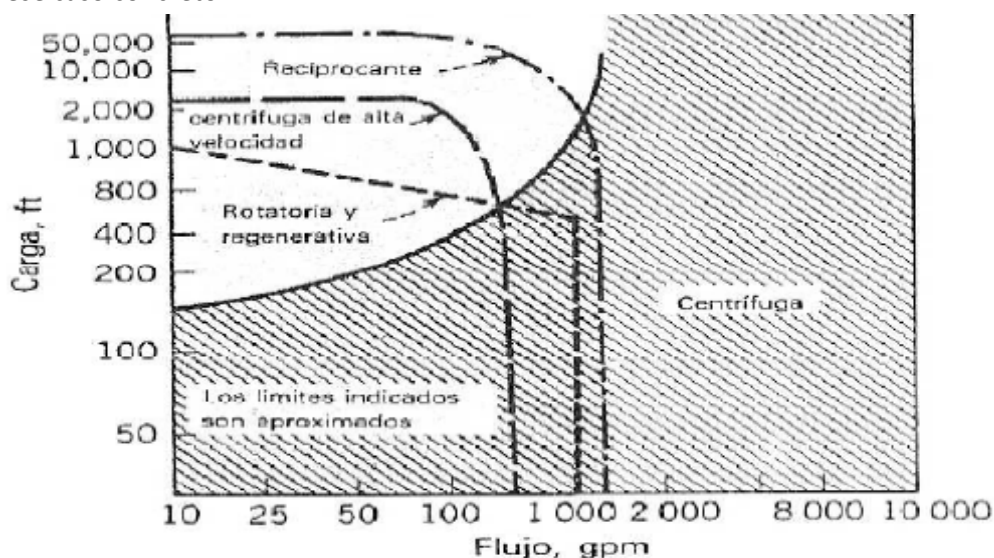
### 12.1. Bombas

La impulsión de líquidos en un proceso químico es fundamental, existiendo dos tipos básicos de bombas: bombas de desplazamiento positivo y bombas centrífugas. La primera de estas bombas se basa en el uso de un pistón que impulsa el líquido, mientras que las centrífugas, como su propio nombre indica, impulsan el fluido gracias a una fuerza centrífuga.

Las bombas se suelen instalar en parejas debido a posibles averías, las tareas de mantenimiento y a aumentar la vida útil de las mismas. Así, el proceso seguirá operativo si una bomba está fuera de servicio por avería o por cualquier otra razón. El empleo de las bombas es alternativo (unos periodos de tiempo (horas, días, etc.) funciona una de las bombas, y otros periodos funciona otra, nunca las dos a la vez).

Por todo ello se calcularán las características de las bombas necesarias (B-01, B-02, B-03 y B-04), y se instalarán por cada punto anteriormente citado una pareja de bombas idénticas.

La elección del tipo de bombas depende de muchos factores, existiendo un método sencillo de selección que es el método gráfico. Mediante este método, conociendo el caudal que es necesario impulsar y la altura útil de impulsión (H), se puede obtener el tipo de bomba idóneo para ese caso concreto.



**Figura A.12.1.**

Selección de equipos de impulsión (Greene Richard W., 1987)

La ventaja de las bombas de desplazamiento positivo es que la altura útil de impulsión que proporcionan es mayor que la de las bombas centrífugas, pero el caudal que expulsan es pulsante (las bombas centrífugas impulsan un caudal continuo) y este caudal que pueden impulsar es menor que el de las bombas centrífugas. Las centrífugas poseen un mantenimiento y un diseño sencillo y son de menor coste a las de desplazamiento positivo.

Los parámetros básicos en el diseño de una bomba son:

- La altura útil de impulsión (H).
- El caudal que es posible impulsar (Q).
- La potencia (P).
- La altura neta de succión positiva (NPSH<sub>d</sub>).

La altura útil de impulsión se define como la presión efectiva que debe aplicar la bomba para elevar el líquido desde el punto más bajo hasta el más alto en elevación venciendo resistencias, desniveles y presiones que existan en el camino. La expresión que permite su cálculo se obtiene de la Ecuación de Bernoulli, y es:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + h_f \quad [\text{A.12.1}]$$

Siendo:

- $\frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g}$  la carga debida a la diferencia de presiones entre los puntos 1 y 2.
- $z_2 - z_1$  la carga debida a la diferencia de altura entre los puntos 1 y 2.
- $\frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g}$  la carga debida a la diferencia de velocidades entre los puntos 1 y 2.
- $h_f$  la carga debida al rozamiento entre los puntos 1 y 2.

Los puntos 1 y 2 corresponden con el punto de aspiración y de descarga de la bomba respectivamente.

La potencia de la bomba se calcula mediante la expresión:

$$P = H \cdot \rho \cdot g \cdot Q \quad [\text{A.12.2}]$$

Siendo:

- P la potencia de la bomba en W.
- H la altura útil de impulsión, en m.
- $\rho$  la densidad del líquido, en kg/m<sup>3</sup>.
- g la aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>).
- Q el caudal volumétrico de líquido, en m<sup>3</sup>/s.

La cavitación es el fenómeno que ocurre en las bombas en el que la presión en la entrada de la bomba (lugar de más baja presión en el sistema) alcanza el valor de la presión de vapor del líquido que se está bombeado. El líquido hervirá y formará burbujas, y éstas se mueven del

área de baja presión de la bomba hacia el área de alta presión, donde el vapor regresa de nuevo a la fase líquida. Esta condensación del líquido produce fuertes ondas de choque que pueden llegar a desprender superficies sólidas circundantes creando cavidades (produce abrasión en el material de la bomba). Con el paso del tiempo se pueden llegar a generar daños irreparables en el cuerpo de la bomba.

La manera de evitar la cavitación es asegurar que la carga total media en la succión de la bomba, denominada altura neta de succión positiva, sea mayor a la carga de presión de vapor del fluido.

De manera formal, el Instituto Hidráulico define la altura neta de succión disponible representada por medio de las siglas  $NPSH_d$  como la carga total, medida en la succión de la bomba, menos la presión de vapor del líquido. Se trata de un análisis de las condiciones energéticas en el lado de succión de la bomba para determinar si el líquido se evapora en el punto de presión más bajo de la bomba. La expresión que permite calcular el  $NPSH_d$  es:

$$NPSH_d = h_{sp} \pm h_s - h_f - h_{vp} \quad [A.12.3]$$

Siendo:

- $h_{sp}$  es la carga de presión estática (en m).
- $h_s$  es la diferencia de altura entre el nivel de líquido en la aspiración y la entrada de la bomba. Se mide en m y es positiva si la bomba está por debajo del punto de aspiración, y negativa si la bomba está por encima del punto de aspiración
- $h_f$  son las pérdidas de carga en la tubería de succión (medidas en m).
- $h_{vp}$  es la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo, en m.

Las ecuaciones que permiten el cálculo de estos términos son:

- $h_{sp}$  se calcula como  $\frac{P_1}{\rho \cdot g}$
- $h_s$  se determina mediante una diferencia de alturas ( $z_2 - z_1$ ).
- $h_f$  se determinó en el **Anexo 11** del presente proyecto.
- $h_{vp}$  se termina mediante la ecuación de Antoine.

Para que la bomba no cavite, la  $NPSH_d$  calculada debe ser mayor a la  $NPSH_r$  (altura neta de succión positiva requerida, se encuentra en los catálogos de las bombas, véase el **Anexo 14**).

A continuación se van a calcular las características necesarias de todas las bombas del proceso.

### 10.1.1. Bomba B-01

La bomba B-01 es la encargada de impulsar el líquido que proviene de la bifurcación (el líquido que pasa por esta bifurcación es el líquido de salida del absorbedor A-01) hasta llevarlo a lo alto de la columna de absorción A-01. El motivo de la existencia de esta bomba es que se necesita un aparato de impulsión que permita salvar la altura de la columna de absorción, la cual es bastante elevada.

Como se comentó anteriormente, las bombas se encuentran duplicadas, por lo que situará una pareja de bombas idénticas cuyas características (de cada una de ellas) corresponderá a las calculadas aquí.

Primero se calculan las pérdidas de carga que debe salvar la bomba, las cuales son las pérdidas de carga que sufre el líquido en las conducciones C-14 y C-16:

$$h_f = 0,41m + 0,19m = 0,60m$$

Al ser el diámetro de las tuberías de aspiración e impulsión el mismo, la velocidad del fluido será la misma a la salida y a la entrada, por lo que el término de carga debida a la diferencia de velocidades entre el punto 1 y 2 se anulará.

La altura a la que se encuentran las tuberías del suelo es 0,5 m, por lo que  $z_1$  poseerá este valor.

A continuación se calcula la altura útil de impulsión mediante la **Ecuación A.12.1**:

$$H = \frac{(1,2atm - 1,2atm) \cdot 101325Pa/atm}{799,80kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2} + (3,72m - 0,5m) + 0,60m = 3,82m$$

Mediante la **Figura A.12.1**. se puede observar que la bomba necesaria para las condiciones que se tienen es una bomba centrífuga (H es 12,53 ft y Q es 10,5 gpm).

Se calcula entonces la potencia requerida de la bomba mediante la **Ecuación A.12.2**:

$$P = 3,82m \cdot \frac{799,80kg}{m^3} \cdot \frac{9,81m}{s^2} \cdot \frac{6,627 \cdot 10^{-4}m^3}{s} = 19,861W$$

Por tanto la bomba consumirá una potencia de 25 W (un 20% más de la potencia necesaria).

Se calcula a continuación la presión de vapor del agua a la temperatura de operación (se supone agua, aunque la mayor parte sea formaldehído, debido que el agua es líquida y el formaldehído, que se encuentra en forma de metilenglicol (del que no se poseen propiedades), está disuelto en este agua). Las constantes se han recogido del **Apartado 2.6.4.** del **Anexo 2**.

$$\ln P^{vap}(mmHg) = A - \frac{B}{C+T(K)} \quad [A.12.4]$$

$$\ln P^{vap}(mmHg) = 18,3036 - \frac{3816,44}{-43,13 + 310K} = 4,00$$

$$P^{vap} = 54,75mmHg = 7299,96 Pa$$

$$h_{vp} = \frac{p^{vap}}{\rho \cdot g} = \frac{7299,96Pa}{799,80kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2} = 0,930m$$

Al encontrarse el punto de aspiración (la bifurcación del líquido) a una altura sobre el suelo 0,5 m, y la altura de la bomba sobre el suelo es también de 0,5 m,  $h_s$  es igual a 0.

Las pérdidas de carga de la aspiración se corresponden con las de la conducción C-13 (la que va de la bifurcación de la bomba) y valen 0,11 m.

Por último se calcula  $h_{sp}$ :

$$h_{sp} = \frac{P_1}{\rho \cdot g} = \frac{1,2atm \cdot 101325Pa/atm}{799,80kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2} = 15,50m$$

Concluyendo, se calcula la altura neta de succión positiva disponible mediante la **Ecuación A.12.3**:

$$NPSH_d = 15,50m + 0 - 0,11m - 0,930m = 14,46m = 47,44ft$$

Ya obtenidas todas las características de la bomba, se elige una que cumpla todas las consideraciones. Así se ha escogido una bomba centrífuga de la marca Liquiflo con una altura útil de impulsión de 65 ft (la necesaria son 63,29 ft), caudal máximo de impulsión 45 gpm (el caudal es de 10,5 gpm, es decir, cumple con creces) que puede operar a temperaturas de hasta 500 °F.

Se puede observar en las curvas de operación de la bomba (véase el **Anexo 14**) que para un caudal de 10,5 gpm la  $NPSH_r$  es de 1,75 ft, por lo que la bomba no cavitará (la  $NPSH_d$  es de 47,78 ft, mucho mayor a la altura de succión neta positiva requerida). Esta bomba además posee diferentes velocidades de impulsión, lo que la hace muy versátil en nuestro proceso (se verá a continuación que todas las bombas serán de este modelo).

### 10.1.2. Bomba B-02

La bomba B-02 es la encargada de impulsar el líquido que proviene de la bifurcación (el líquido que pasa por esta bifurcación es el líquido de salida del absorbedor A-01) hasta llevarlo al mezclador M-01. El motivo de la existencia de esta bomba es que si no estuviera la mayoría del líquido se iría por la conducción C-13 (la de la bomba B-01).

Como se comentó anteriormente, las bombas se encuentran duplicadas, por lo que situará una pareja de bombas idénticas cuyas características (de cada una de ellas) corresponderá a las calculadas aquí.

Primero se calculan las pérdidas de carga que debe salvar la bomba, las cuales son las pérdidas de carga que sufre el líquido en la conducción C-18:

$$h_f = 0,31m$$



Al ser el diámetro de las tuberías de aspiración e impulsión el mismo, la velocidad del fluido será la misma a la salida y a la entrada, por lo que el término de carga debida a la diferencia de velocidades entre el punto 1 y 2 se anulará.

La altura a la que se encuentran las tuberías del suelo es 0,5 m, por lo que  $z_1$  poseerá este valor. La altura de llegada del líquido al Mezclador M-01 será la misma que la altura de las tuberías sobre el suelo, por lo que  $z_2$  será 0,5 m.

A continuación se calcula la altura útil de impulsión mediante la **Ecuación A.12.1**:

$$H = \frac{(1,2atm - 1,2atm) \cdot 101325Pa/atm}{799,80kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2} + (0,5m - 0,5m) + 0,31m = 0,31m$$

Mediante la **Figura A.12.1**, se puede observar que la bomba necesaria para las condiciones que se tienen es una bomba centrífuga.

Se calcula entonces la potencia requerida de la bomba mediante la **Ecuación A.12.2**:

$$P = 0,31m \cdot \frac{799,80kg}{m^3} \cdot \frac{9,81m}{s^2} \cdot \frac{6,627 \cdot 10^{-4}m^3}{s} = 1,612W$$

Debido a la baja potencia de la bomba, y que si se conecta a esa potencia el líquido tenderá a ir por la conducción C-13 en vez de por la conducción C-17, se usará la misma potencia que la de la bomba B-01, es decir, 25 W.

Se supondrá, lo mismo que antes, que la corriente, aunque sea una corriente formada por metilenglicol en agua, la presión de vapor es la correspondiente al agua. Al ser la temperatura de operación la misma que la de la bomba B-01, el valor de  $h_{vp}$  es el mismo.

$$h_{vp} = 0,930m$$

Al encontrarse el punto de aspiración (la bifurcación del líquido) a una altura sobre el suelo 0,5 m, y la altura de la bomba sobre el suelo es también de 0,5 m,  $h_s$  es igual a 0.

Las pérdidas de carga de la aspiración se corresponden con las de la conducción C-17 (la que va de la bifurcación de la bomba) y valen 0,11 m.

Por último se calcula  $h_{sp}$ :

$$h_{sp} = \frac{P_1}{\rho \cdot g} = \frac{1,2atm \cdot 101325Pa/atm}{799,80kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2} = 15,50m$$

Concluyendo, se calcula la altura neta de succión positiva disponible mediante la **Ecuación A.12.3**:

$$NPSH_d = 15,50m + 0 - 0,11m - 0,930m = 14,46m = 47,44ft$$

Se va a usar la bomba escogida en el punto anterior (bomba B-01) por poseer unas características acordes con lo requerido.

### 10.1.3. Bomba B-03

La bomba B-03 es la encargada de trasvasar el líquido desde el mezclador M-01 al depósito Rundown. El motivo de la existencia de esta bomba es que el líquido que se no posee energía cinética que se encuentra en el mezclador debe llegar al depósito Rundown que se encuentra a una distancia considerable. Por ello se necesita un aparato de impulsión que permita salvar las pérdidas de carga en esa tubería y que le otorgue energía cinética al líquido.

Como se comentó anteriormente, las bombas se encuentran duplicadas, por lo que situará una pareja de bombas idénticas cuyas características (de cada una de ellas) corresponderá a las calculadas aquí.

La bomba aquí hallada será la misma que las bombas necesaria que debe haber entre los depósitos de producto (ocurre el mismo caso, solo que las distancias son un poco menores). Por lo tanto, además de las dos bombas que se necesitan para trasvasar el líquido del mezclador M-01 al depósito Rundown, deberá haber 8 bombas más para trasvasar el líquido del depósito Rundown a los depósitos finales (son 2 bombas por conducción).

Primero se calculan las pérdidas de carga que debe salvar la bomba, las cuales son las pérdidas de carga que sufre el líquido en la conducción C-20:

$$h_f = 4,62m$$

La altura a la que se encuentran las tuberías del suelo es 0,5 m, por lo que  $z_1$  poseerá este valor y  $z_2$  poseerán ese valor, por lo que se anularán (el líquido entrará al depósito Rundown a una altura sobre el suelo de 0,5 m).

La presión en el mezclador es la presión atmosférica, y la presión a la que la bomba va a impulsar el líquido va a ser de 1,2 atm. La velocidad del fluido en el mezclador es 0.

A continuación se calcula la altura útil de impulsión mediante la **Ecuación A.12.1**:

$$H = \frac{(1,2atm - 1atm) \cdot 101325Pa/atm}{923,76kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2} + \frac{(1,398m/s)^2 - 0}{2 \cdot 9,81m/s^2} + 4,62m = 6,91m$$

Mediante la **Figura A.12.1**. se puede observar que la bomba necesaria para las condiciones que se tienen es una bomba centrífuga.

Se calcula entonces la potencia requerida de la bomba mediante la **Ecuación A.12.2**:

$$P = 6,91m \cdot \frac{923,76kg}{m^3} \cdot \frac{9,81m}{s^2} \cdot \frac{8,530 \cdot 10^{-4}m^3}{s} = 53,771W$$

Por tanto la bomba consumirá una potencia de 70 W (un 20% más de la potencia necesaria).

Se calcula a continuación la presión de vapor del agua a la temperatura de operación (se supone agua por la misma consideración de antes). Las constantes se han recogido del **Apartado 2.6.4. del Anexo 2**.

$$\ln P^{vap}(mmHg) = A - \frac{B}{C+T(K)} \quad [A.12.5]$$

$$\ln P^{vap}(mmHg) = 18,3036 - \frac{3816,44}{-43,13 + 298K} = 3,33$$

$$P^{vap} = 27,93mmHg = 3723,07 Pa$$

$$h_{vp} = \frac{P^{vap}}{\rho \cdot g} = \frac{3723,07Pa}{923,76kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2} = 0,411m$$

Al encontrarse el punto de aspiración (la bifurcación del líquido) a una altura sobre el suelo 0,5 m, y la altura de la bomba sobre el suelo es también de 0,5 m,  $h_s$  es igual a 0.

Las pérdidas de carga de la aspiración son prácticamente 0 al encontrarse la bomba muy cercana al mezclador.

Por último se calcula  $h_{sp}$ :

$$h_{sp} = \frac{P_1}{\rho \cdot g} = \frac{1,2atm \cdot 101325Pa/atm}{923,76kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2} = 11,18m$$

Concluyendo, se calcula la altura neta de succión positiva disponible mediante la **Ecuación A.12.3**:

$$NPSH_d = 11,18m + 0 - 0m - 0,411m = 10,770m = 35,33ft$$

Ya obtenidas todas las características de la bomba, se puede observar que la bomba que se escogió anteriormente para las bomba B-01 y B-02 es válida también para este proceso.

Se puede observar en las curvas de operación de la bomba (véase el **Anexo 14**) que para un caudal de 13,5 gpm la  $NPSH_r$  es de 2,25 ft, por lo que la bomba no cavitará (la  $NPSH_d$  es de 35,33 ft, mucho mayor a la altura de succión neta positiva requerida).

#### 10.1.4. Bomba B-04

La bomba B-04 es la encargada de impulsar el líquido desde el depósito de metanol al intercambiador IC-01. El motivo de la existencia de esta bomba es que el líquido que se no posee energía cinética que se encuentra en el mezclador debe llegar al intercambiador IC-01 a una determinada presión, y este intercambiador se encuentra a una distancia considerable. Por ello se necesita un aparato de impulsión que permita salvar las pérdidas de carga en esa tubería, que le de presión y que le otorgue energía cinética al líquido.

Como se comentó anteriormente, las bombas se encuentran duplicadas, por lo que situará una pareja de bombas idénticas cuyas características (de cada una de ellas) corresponderá a las calculadas aquí.

Primero se calculan las pérdidas de carga que debe salvar la bomba, las cuales son las pérdidas de carga que sufre el líquido en la conducción C-01:

$$h_f = 2,28m$$

La altura a la que se encuentran las tuberías del suelo es 0,5 m, por lo que  $z_1$  poseerá este valor y  $z_2$  poseerán ese valor, por lo que se anularán (el líquido entrará al depósito Rundown a una altura sobre el suelo de 0,5 m).

La presión en el depósito es la presión atmosférica, y la presión a la que la bomba va a impulsar el líquido va a ser de 1,15 atm. La velocidad del fluido en el depósito es 0.

A continuación se calcula la altura útil de impulsión mediante la **Ecuación A.12.1**:

$$H = \frac{(1,15atm - 1atm) \cdot 101325Pa/atm}{797,60kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2} + \frac{(1,155m/s)^2 - 0}{2 \cdot 9,81m/s^2} + 2,28m = 4,29m$$

Mediante la **Figura A.12.1**. se puede observar que la bomba necesaria para las condiciones que se tienen es una bomba centrífuga.

Se calcula entonces la potencia requerida de la bomba mediante la **Ecuación A.12.2**:

$$P = 4,29m \cdot \frac{797,60kg}{m^3} \cdot \frac{9,81m}{s^2} \cdot \frac{3,974 \cdot 10^{-4}m^3}{s} = 13,342W$$

Por tanto la bomba consumirá una potencia de 20 W (un 20% más de la potencia necesaria).

Se calcula a continuación la presión de vapor del metanol a la temperatura de operación (se supone metanol porque la corriente está formada en un 98% por metanol). Las constantes se han recogido del **Apartado 2.6.4.** del **Anexo 2**.

$$\ln P^{vap}(mmHg) = A - \frac{B}{C+T(K)} \quad [A.12.6]$$

$$\ln P^{vap}(\text{mmHg}) = 18,5875 - \frac{3626,55}{-34,29 + 298K} = 4,84$$

$$P^{vap} = 125,90\text{mmHg} = 16784,85\text{ Pa}$$

$$h_{vp} = \frac{P^{vap}}{\rho \cdot g} = \frac{16784,85\text{Pa}}{797,60\text{kg/m}^3 \cdot 9,81\text{m/s}^2} = 2,145\text{m}$$

Al encontrarse el punto de aspiración (la bifurcación del líquido) a una altura sobre el suelo 0,5 m, y la altura de la bomba sobre el suelo es también de 0,5 m,  $h_s$  es igual a 0.

Las pérdidas de carga de la aspiración son prácticamente 0 al encontrarse la bomba muy cercana al depósito.

Por último se calcula  $h_{sp}$ :

$$h_{sp} = \frac{P_1}{\rho \cdot g} = \frac{1,15\text{atm} \cdot 101325\text{Pa/atm}}{797,60\text{kg/m}^3 \cdot 9,81\text{m/s}^2} = 12,95\text{m}$$

Concluyendo, se calcula la altura neta de succión positiva disponible mediante la **Ecuación A.12.3**:

$$NPSH_d = 12,95\text{m} + 0 - 0\text{m} - 2,145\text{m} = 10,805\text{m} = 35,45\text{ft}$$

Ya obtenidas todas las características de la bomba, se puede observar que la bomba que se escogió anteriormente para las bomba B-01, B-02 y B-03 es válida también para este proceso.

Se puede observar en las curvas de operación de la bomba (véase el **Anexo 14**) que para un caudal de 6,30 gpm la  $NPSH_r$  es de 1 ft, por lo que la bomba no cavitará (la  $NPSH_d$  es de 35,45 ft, mucho mayor a la altura de succión neta positiva requerida).

## 10.2. Soplates

La impulsión de gases se realiza mediante tres tipos de equipos dependiendo del aumento de presión de los gases. Así si el aumento es elevado se usan compresores, si es pequeño se usan ventiladores y para rangos intermedios se usan soplates.

En la planta el aumento de presiones que sufren los gases al impulsarlos se encuentra en el rango de los ventiladores y el de los soplates (se encuentra en el rango de los ventiladores de alta presión y de los soplates de baja presión). En este caso se usarán soplates, pero como el rango de presiones se encuentra en un rango de ventiladores, se supondrá que la densidad del gas no varía.

Los parámetros de los que depende el uso de ventiladores y soplates son el caudal de gas que se debe impulsar y el aumento de presión que se requiere. Mediante estos parámetros se

puede calcular el ventilador o soplante necesario para el proceso mediante unas tablas. Pero otro método para determinar el soplante o ventilador necesario es buscar un soplante que cumpla con las características requeridas (caudal de impulsión, aumento de presión, temperatura de operación, etc.).

Así se ha escogido un soplante de la marca Aerzen que se usa para impulsión de gases corrosivos (este soplante permite su diseño en aleaciones de cromo-níquel, como el Acero Carpentier 20, que es resistente al formaldehído) con diferencia de presiones de hasta 800 mbar y caudales de aspiración desde 100 hasta 50000 m<sup>3</sup>/h (para más información véase el **Anexo 14**).

En este catálogo nos ofrece una ecuación para el cálculo de la potencia que consume el soplante conociendo el aumento de presión y el caudal de gas:

$$P = \frac{\Delta P \cdot Q}{600} \quad \text{A.12.7]}$$

Siendo:

- P la potencia del soplante, en W.
- $\Delta P$  el aumento de presión requerido en Pa.
- Q el caudal volumétrico de gas en m<sup>3</sup>/min.

Se comprobará a continuación que el soplante escogido cumple con las exigencias del sistema y se calculará la potencia que consuma cada soplante

### 10.2.1. Cálculo de la potencia necesaria

En la planta se poseen 3 soplantes:

- **V-01:** este soplante es el encargado de impulsar el gas proveniente del intercambiador IC-02 y llevarlo al reactor.

La presión de entrada al soplante se ha calculado anteriormente en el **Anexo 9** al calcular las pérdidas de carga en las tuberías:

$$P_{ent} = 1,142 \text{ atm}$$

La presión de salida debe ser de 1,25 atm. Por tanto el aumento de presión debe ser de 0,108 atm (108 mbar, por lo que el soplante escogido cumple este requisito).

El caudal de gas que debe impulsar es de 5,914 m<sup>3</sup>/s (21290 m<sup>3</sup>/h, por lo que también cumple este requisito al encontrarse en el rango de caudales).

Se calcula la potencia necesaria:

$$P = \frac{0,108 \text{ atm} \cdot \frac{101325 \text{ Pa}}{\text{atm}} \cdot 354,84 \text{ m}^3/\text{min}}{600} = 6471,42 \text{ W}$$

Se sobredimensiona un 20% este valor y la potencia necesaria para este soplante es de 7800 W.

- **V-02:** este soplante es el encargado de impulsar el gas de salida del reactor R-01 y llevarlo al intercambiador IC-01.

La presión de entrada al soplante se ha calculado anteriormente en el **Anexo 9** al calcular las pérdidas de carga en las tuberías:

$$P_{ent} = 1,079 \text{ atm}$$

La presión de salida debe ser de 1,2 atm. Por tanto el aumento de presión debe ser de 0,121 atm (121 mbar, por lo que el soplante escogido cumple este requisito).

El caudal de gas que debe impulsar es de 5,019 m<sup>3</sup>/s (18068,4 m<sup>3</sup>/h, por lo que también cumple este requisito al encontrarse en el rango de caudales).

Se calcula la potencia necesaria:

$$P = \frac{0,121 \text{ atm} \cdot \frac{101325 \text{ Pa}}{\text{atm}} \cdot 301,14 \text{ m}^3/\text{min}}{600} = 6152,97 \text{ W}$$

Se sobredimensiona un 20% este valor y la potencia necesaria para este soplante es de 7400 W.

- **V-03:** este soplante es el encargado de impulsar el aire atmosférico y llevarlo al intercambiador IC-01. La presión de entrada al soplante es de 1 atm (presión atmosférica) y la de salida debe ser de 1,15 atm. Por tanto el aumento de presión debe ser de 0,15 atm (150 mbar, por lo que el soplante escogido cumple este requisito).

El caudal de gas que debe impulsar es de 4,124 m<sup>3</sup>/s (14846,4 m<sup>3</sup>/h, por lo que también cumple este requisito al encontrarse en el rango de caudales).

Se calcula la potencia necesaria:

$$P = \frac{0,15 \text{ atm} \cdot \frac{101325 \text{ Pa}}{\text{atm}} \cdot 247,44 \text{ m}^3/\text{min}}{600} = 6257,63 \text{ W}$$

Se sobredimensiona un 20% este valor y la potencia necesaria para este soplante es de 7600 W.

Por lo tanto el soplante elegido es válido para todos los puntos de impulsión de gases.

Al igual que las bombas, los soplantes se instalarán en parejas debido a posibles averías, las tareas de mantenimiento y a aumentar la vida útil de los mismos. Así, el proceso seguirá operativo si una bomba está fuera de servicio por avería o por cualquier otra razón. La operación de los soplantes será alternativo (unos periodos de tiempo (horas, días, etc.) funciona una de las bombas, y otros periodos funciona otra, nunca las dos a la vez). Por tanto se necesitarán 6 soplantes en el proceso (los 6 exactamente idénticos, siendo el modelo el escogido de la marca Aerzen).



## Anexo 13: Tablas

**Tabla A.13.1.**  
Propiedades del agua a diferentes temperaturas (Incropera & DeWitt, 1999)

Temperatura, $T$ (K)	Presión $P$ (bars) <sup>b</sup>	Volumen específico (m <sup>3</sup> /kg)		Entalpía de vapo- rización $h_{fg}$ (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg · K)		Viscosidad (N · s/m <sup>2</sup> )		Conductividad térmica (W/m · K)		Número de Prandtl		Tensión superficial $\alpha_f \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de expan- sión $\beta_f \cdot 10^6$ (K <sup>-1</sup> )
		$v_f \cdot 10^3$	$v_g$		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	$Pr_f$	$Pr_g$		
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1
305	0.04712	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9
315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0
335	0.2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0
345	0.3372	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4
350	0.4163	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	365	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1
370	0.9040	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7
373.15	1.0133	1.044	1.679	2257	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1
375	1.0815	1.045	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761
380	1.2869	1.049	1.337	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788
385	1.5233	1.053	1.142	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814

Tabla A.3.1. (Continuación)

390	1.794	1.058	0.980	2212	4.239	2.104	237	12.69	686	26.3	1.47	1.013	55.6	841
400	2.455	1.067	0.731	2183	4.256	2.158	217	13.05	688	27.2	1.34	1.033	53.6	896
410	3.302	1.077	0.553	2153	4.278	2.221	200	13.42	688	28.2	1.24	1.054	51.5	952
420	4.370	1.088	0.425	2123	4.302	2.291	185	13.79	688	29.8	1.16	1.075	49.4	1010
430	5.699	1.099	0.331	2091	4.331	2.369	173	14.14	685	30.4	1.09	1.10	47.2	
440	7.333	1.110	0.261	2059	4.36	2.46	162	14.50	682	31.7	1.04	1.12	45.1	
450	9.319	1.123	0.208	2024	4.40	2.56	152	14.85	678	33.1	0.99	1.14	42.9	
460	11.71	1.137	0.167	1989	4.44	2.68	143	15.19	673	34.6	0.95	1.17	40.7	
470	14.55	1.152	0.136	1951	4.48	2.79	136	15.54	667	36.3	0.92	1.20	38.5	
480	17.90	1.167	0.111	1912	4.53	2.94	129	15.88	660	38.1	0.89	1.23	36.2	
490	21.83	1.184	0.0922	1870	4.59	3.10	124	16.23	651	40.1	0.87	1.25	33.9	—
500	26.40	1.203	0.0766	1825	4.66	3.27	118	16.59	642	42.3	0.86	1.28	31.6	—
510	31.66	1.222	0.0631	1779	4.74	3.47	113	16.95	631	44.7	0.85	1.31	29.3	—
520	37.70	1.244	0.0525	1730	4.84	3.70	108	17.33	621	47.5	0.84	1.35	26.9	—
530	44.58	1.268	0.0445	1679	4.95	3.96	104	17.72	608	50.6	0.85	1.39	24.5	—
540	52.38	1.294	0.0375	1622	5.08	4.27	101	18.1	594	54.0	0.86	1.43	22.1	—
550	61.19	1.323	0.0317	1564	5.24	4.64	97	18.6	580	58.3	0.87	1.47	19.7	—
560	71.08	1.355	0.0269	1499	5.43	5.09	94	19.1	563	63.7	0.90	1.52	17.3	—
570	82.16	1.392	0.0228	1429	5.68	5.67	91	19.7	548	76.7	0.94	1.59	15.0	—
580	94.51	1.433	0.0193	1353	6.00	6.40	88	20.4	528	76.7	0.99	1.68	12.8	—
590	108.3	1.482	0.0163	1274	6.41	7.35	84	21.5	513	84.1	1.05	1.84	10.5	—
600	123.5	1.541	0.0137	1176	7.00	8.75	81	22.7	497	92.9	1.14	2.15	8.4	—
610	137.3	1.612	0.0115	1068	7.85	11.1	77	24.1	467	103	1.30	2.60	6.3	—
620	159.1	1.705	0.0094	941	9.35	15.4	72	25.9	444	114	1.52	3.46	4.5	—
625	169.1	1.778	0.0085	858	10.6	18.3	70	27.0	430	121	1.65	4.20	3.5	—
630	179.7	1.856	0.0075	781	12.6	22.1	67	28.0	412	130	2.0	4.8	2.6	—
635	190.9	1.935	0.0066	683	16.4	27.6	64	30.0	392	141	2.7	6.0	1.5	—
640	202.7	2.075	0.0057	560	26	42	59	32.0	367	155	4.2	9.6	0.8	—
645	215.2	2.351	0.0045	361	90	—	54	37.0	331	178	12	26	0.1	—
647.3°	221.2	3.170	0.0032	0	∞	∞	45	45.0	238	238	∞	∞	0.0	—

\*Adaptada de la referencia 19.  
 †1 bar = 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup>.  
 °Temperatura crítica.

Tabla A.13.2.

Densidad del metanol a diferentes concentraciones y temperaturas (Perry et al., 2001)

%	0°C	10°C	15.56°C	20°C	15°C	%	0°C	10°C	15.56°C	20°C	15°C	%	0°C	10°C	15.56°C	20°C	15°C
0	0.9909	0.9907	0.9900	0.9882	0.98913	35	0.9534	0.9484	0.9456	0.9433	0.94570	70	0.8869	0.8794	0.8748	0.8715	0.87507
1	0.981	0.980	0.973	0.965	0.9727	36	0.9520	0.9460	0.9440	0.9416	0.94404	71	0.8847	0.8770	0.8726	0.8690	0.87271
2	0.963	0.962	0.955	0.948	0.9543	37	0.9505	0.9453	0.9422	0.9398	0.94237	72	0.8824	0.8747	0.8702	0.8665	0.87033
3	0.946	0.945	0.938	0.931	0.9370	38	0.9490	0.9437	0.9405	0.9381	0.94067	73	0.8801	0.8724	0.8678	0.8641	0.86702
4	0.930	0.929	0.921	0.914	0.9198	39	0.9475	0.9420	0.9387	0.9363	0.93804	74	0.8778	0.8699	0.8653	0.8616	0.86546
5	0.914	0.912	0.904	0.896	0.9029	40	0.9459	0.9403	0.9369	0.9345	0.93720	75	0.8754	0.8676	0.8629	0.8592	0.86300
6	0.899	0.896	0.889	0.880	0.8864	41	0.9443	0.9387	0.9351	0.9327	0.93543	76	0.8729	0.8651	0.8604	0.8567	0.86051
7	0.884	0.881	0.872	0.863	0.8701	42	0.9427	0.9370	0.9333	0.9309	0.93365	77	0.8705	0.8626	0.8579	0.8542	0.85801
8	0.870	0.865	0.857	0.847	0.8547	43	0.9411	0.9352	0.9315	0.9290	0.93185	78	0.8680	0.8602	0.8554	0.8518	0.85551
9	0.856	0.849	0.841	0.831	0.8384	44	0.9395	0.9334	0.9297	0.9272	0.93001	79	0.8657	0.8577	0.8529	0.8494	0.85300
10	0.842	0.834	0.826	0.815	0.8241	45	0.9377	0.9316	0.9279	0.9252	0.92815	80	0.8634	0.8551	0.8503	0.8469	0.85048
11	0.829	0.820	0.811	0.799	0.80803	46	0.9360	0.9298	0.9261	0.9234	0.92627	81	0.8610	0.8527	0.8478	0.8446	0.84794
12	0.816	0.805	0.796	0.784	0.7945	47	0.9342	0.9279	0.9242	0.9214	0.92436	82	0.8585	0.8501	0.8452	0.8420	0.84536
13	0.804	0.791	0.781	0.768	0.77802	48	0.9324	0.9260	0.9223	0.9196	0.92242	83	0.8560	0.8475	0.8426	0.8394	0.84274
14	0.792	0.778	0.766	0.754	0.7660	49	0.9306	0.9240	0.9204	0.9176	0.92048	84	0.8535	0.8449	0.8400	0.8366	0.84000
15	0.780	0.764	0.752	0.740	0.7518	50	0.9287	0.9221	0.9185	0.9156	0.91852	85	0.8510	0.8422	0.8374	0.8340	0.83742
16	0.769	0.751	0.738	0.725	0.7377	51	0.9269	0.9202	0.9166	0.9135	0.91653	86	0.8483	0.8394	0.8347	0.8314	0.83475
17	0.758	0.739	0.723	0.710	0.7237	52	0.9250	0.9182	0.9146	0.9114	0.91451	87	0.8456	0.8367	0.8320	0.8286	0.83207
18	0.747	0.726	0.709	0.696	0.7096	53	0.9230	0.9162	0.9126	0.9094	0.91248	88	0.8428	0.8340	0.8294	0.8258	0.82937
19	0.736	0.713	0.695	0.681	0.6955	54	0.9211	0.9142	0.9106	0.9073	0.91044	89	0.8400	0.8314	0.8267	0.8230	0.82667
20	0.725	0.700	0.680	0.666	0.6814	55	0.9191	0.9122	0.9086	0.9052	0.90830	90	0.8374	0.8287	0.8239	0.8202	0.82306
21	0.714	0.687	0.666	0.651	0.6673	56	0.9172	0.9101	0.9065	0.9032	0.90631	91	0.8347	0.8261	0.8212	0.8174	0.82124
22	0.702	0.673	0.652	0.636	0.6533	57	0.9151	0.9080	0.9045	0.9010	0.90421	92	0.8320	0.8234	0.8185	0.8146	0.81840
23	0.690	0.660	0.638	0.622	0.6392	58	0.9131	0.9060	0.9024	0.8988	0.90210	93	0.8293	0.8208	0.8157	0.8118	0.81568
24	0.678	0.646	0.624	0.607	0.6251	59	0.9111	0.9039	0.9002	0.8968	0.89996	94	0.8266	0.8180	0.8129	0.8090	0.81285
25	0.666	0.632	0.609	0.592	0.6108	60	0.9090	0.9018	0.8980	0.8946	0.89781	95	0.8240	0.8152	0.8101	0.8062	0.80990
26	0.654	0.618	0.595	0.576	0.5963	61	0.9068	0.8998	0.8958	0.8924	0.89563	96	0.8212	0.8124	0.8073	0.8034	0.80713
27	0.642	0.604	0.580	0.562	0.5817	62	0.9046	0.8977	0.8936	0.8902	0.89341	97	0.8186	0.8096	0.8045	0.8005	0.80428
28	0.629	0.590	0.565	0.546	0.5668	63	0.9024	0.8955	0.8913	0.8879	0.89117	98	0.8158	0.8068	0.8016	0.7976	0.80143
29	0.616	0.575	0.550	0.531	0.5518	64	0.9002	0.8933	0.8890	0.8856	0.88890	99	0.8130	0.8040	0.7987	0.7948	0.79859
30	0.604	0.560	0.535	0.515	0.5366	65	0.8980	0.8911	0.8867	0.8834	0.88662	100	0.8102	0.8009	0.7959	0.7917	0.79577
31	0.590	0.546	0.521	0.499	0.5213	66	0.8958	0.8888	0.8844	0.8811	0.88433						
32	0.576	0.531	0.505	0.483	0.5056	67	0.8935	0.8865	0.8820	0.8787	0.88203						
33	0.563	0.516	0.489	0.466	0.4896	68	0.8913	0.8842	0.8797	0.8763	0.87971						
34	0.549	0.500	0.473	0.450	0.4734	69	0.8891	0.8818	0.8771	0.8738	0.87739						

\*It should be noted that the values for 100 percent do not agree with some data available elsewhere, e.g., *American Institute of Physics Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1957. Also, see Atack, *Handbook of Chemical Data*, Reinhold, New York, 1957.



**Tabla A.13.3.**  
Constantes para el cálculo de la densidad de diferentes líquidos (Perry et al., 2001)

Compd. no.	Name	Formula	CAS no.	Mol. wt.	C1	C2	C3	C4	T <sub>amb</sub> , K	Density at T <sub>amb</sub>	T <sub>amb</sub> , K
1	Methane	CH <sub>4</sub>	74828	16.043	2.9214	0.28976	190.56	0.28881	90.69	28.18	190.56
2	Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	74840	30.070	1.9122	0.27937	305.32	0.29187	90.35	21.64	305.32
3	Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	74986	44.097	1.3757	0.27453	369.83	0.29399	85.47	16.583	369.83
4	n-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	106978	58.123	1.0677	0.27188	425.12	0.28688	134.86	12.62	425.12
5	n-Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	109660	72.150	0.84947	0.26736	469.7	0.27769	143.42	10.474	469.7
6	n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	110543	86.177	0.70824	0.26411	507.6	0.27537	177.83	8.747	507.6
7	n-Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	142825	100.204	0.61269	0.26211	540.2	0.28141	182.57	7.6998	540.2
8	n-Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	111659	114.231	0.53731	0.26115	568.7	0.28034	216.38	6.6998	568.7
9	n-Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	111842	128.258	0.48387	0.26147	594.6	0.28261	219.66	6.007	594.6
10	n-Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	124185	142.285	0.42831	0.25745	617.7	0.28912	243.51	5.3811	617.7
11	n-Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	1130214	156.312	0.39	0.25678	639	0.2913	247.57	4.9362	639
12	n-Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	112403	170.338	0.35541	0.25511	688	0.29368	263.57	4.5132	688
13	n-Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	629505	184.365	0.3216	0.2504	675	0.3071	267.76	4.2035	675
14	n-Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	629594	198.392	0.30545	0.2535	693	0.30838	279.01	3.8924	693
15	n-Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	629629	212.419	0.28445	0.25269	706	0.30786	283.07	3.6471	706
16	n-Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	544763	226.446	0.26807	0.25287	723	0.31143	291.31	3.4187	723
17	n-Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	629787	240.473	0.2545	0.254	736	0.31072	298.13	3.2241	736
18	n-Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	593453	254.500	0.23864	0.25272	747	0.31104	301.31	3.0466	747
19	n-Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	629925	268.527	0.22451	0.25133	758	0.3133	305.04	2.8933	758
20	n-Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	112958	282.553	0.21624	0.25287	768	0.31613	309.58	2.7496	768
21	2-Methylpropane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	75285	58.123	1.0463	0.27394	408.14	0.27301	113.54	12.575	408.14
22	2-Methylbutane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	78784	72.150	0.9079	0.2761	460.43	0.28673	113.25	10.776	460.43
23	2,3-Dimethylbutane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	79298	86.177	0.76929	0.27524	499.98	0.27691	145.19	9.0343	499.98
24	2-Methylpentane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	107835	86.177	0.73335	0.2687	497.5	0.28361	119.55	9.2041	497.5
25	2,3-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	565593	100.204	0.7229	0.26614	537.35	0.2713	160.00	7.8746	537.35
26	2,3,3-Trimethylpentane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	560214	114.231	0.6028	0.27446	573.5	0.2741	172.22	7.0634	573.5
27	2,2,4-Trimethylpentane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	540541	114.231	0.5886	0.27373	543.95	0.2846	165.78	6.9163	543.95
28	Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	74851	28.054	2.0961	0.27657	282.34	0.29147	104.00	23.326	282.34
29	Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	115071	42.081	1.4094	0.26465	365.57	0.295	87.89	18.143	365.57
30	1-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	106989	56.108	1.0972	0.2649	419.95	0.29043	87.80	14.326	419.95
31	cis-2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	590181	56.108	1.1609	0.27104	435.58	0.2816	134.26	13.896	435.58
32	trans-2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	624546	56.108	1.1426	0.27095	428.63	0.2854	167.62	13.1	428.63
33	1-Pentene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	109671	70.134	0.9038	0.26648	464.78	0.2905	107.93	11.543	464.78
34	1-Hexene	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	592416	84.161	0.7389	0.26147	504.03	0.2902	133.39	9.6388	504.03
35	1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	592767	98.188	0.63734	0.26319	537.29	0.27375	154.27	8.1789	537.29
36	1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	111660	112.215	0.5871	0.27005	566.65	0.27187	171.45	7.1247	566.65
37	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	124118	126.242	0.4945	0.26108	593.25	0.27319	191.78	6.333	593.25
38	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>	873059	140.269	0.44244	0.25835	616.4	0.28411	206.89	5.7131	616.4
39	2-Methylpropene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	115117	56.108	1.1454	0.2725	417.9	0.28186	132.81	13.506	417.9
40	2-Methyl-1-butene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	563462	70.134	0.91619	0.26752	465	0.28164	135.58	11.332	465
41	2-Methyl-2-butene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	513359	70.134	0.93322	0.27251	471	0.26031	139.39	11.218	471
42	1,3-Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	590192	54.092	1.187	0.26114	452	0.3065	136.85	15.123	452
43	1,3-Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	106990	54.092	1.2384	0.2725	425.17	0.28813	164.25	14.061	425.17
44	2-Methyl-1,3-butadiene <sup>1</sup>	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	78795	68.119	0.95673	0.26488	484	0.28571	127.27	12.205	484
45	Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	74862	26.038	2.4091	0.27223	308.32	0.28477	192.40	23.692	308.32
46	Methylacetylene	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	74997	40.065	1.6086	0.26448	402.39	0.279	170.45	19.027	402.39
47	Dimethylacetylene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	503173	54.092	1.1717	0.25995	473.2	0.27399	240.91	13.767	473.2
48	3-Methyl-1-butyne	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	598232	68.119	0.94575	0.26008	463.2	0.30807	183.45	11.519	463.2
49	1-Pentyne	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	627190	68.119	0.8491	0.2332	481.2	0.353	167.45	12.532	481.2
50	2-Pentyne	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	627214	68.119	0.92069	0.25419	519	0.31077	163.83	12.24	519
51	1-Hexyne	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	693027	82.145	0.84427	0.27185	516.2	0.2771	141.25	10.23	516.2
52	2-Hexyne	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	764352	82.145	0.78277	0.25245	549	0.31611	183.65	10.133	549
53	3-Hexyne <sup>1</sup>	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	928494	82.145	0.78045	0.26065	544	0.28571	170.05	10.021	544

Tabla A.13.3. (Continuación)

54	1-Heptyne	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>	628717	96.172	0.67366	0.26003	559	0.29804	192.22	8.4987	539
55	1-Octyne	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>	629050	110.199	0.59229	0.26118	585	0.29357	193.55	7.478	585
56	Vinylacetylene <sup>2</sup>	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub>	689974	52.076	1.2703	0.26041	454	0.297	173.15	15.664	454
57	Cyclopentane	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	287923	70.134	1.134	0.26859	511.76	0.2506	179.28	11.883	511.76
58	Methylcyclopentane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	96377	84.161	0.84798	0.27042	532.79	0.26276	130.73	10.492	532.79
59	Ethylcyclopentane	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	1640897	98.188	0.7193	0.26936	569.52	0.2777	134.71	9.018	569.52
60	Cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	110827	84.161	0.8908	0.27396	553.58	0.2651	279.69	9.3797	553.58
61	Methylcyclohexane	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	108872	98.188	0.735	0.27041	572.19	0.2927	146.58	9.018	572.19
62	1,1-Dimethyl- cyclohexane	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	590669	112.215	0.58873	0.26143	591.15	0.27758	239.66	7.3417	591.15
63	Ethylcyclohexane	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	1678917	112.215	0.61587	0.26477	609.15	0.28054	161.84	7.8679	609.15
64	Cyclopentene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	142290	68.119	1.1035	0.27035	507	0.26699	138.13	13.47	507
65	1-Methylcyclopentene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	693890	82.145	0.88824	0.26914	542	0.27874	146.62	10.96	542
66	Cyclohexene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	110838	82.145	0.92967	0.27056	560.4	0.28943	169.67	11.16	560.4
67	Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	71432	78.114	1.0162	0.2655	562.16	0.28212	278.68	11.421	562.16
68	Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	108883	92.141	0.8485	0.26655	591.5	0.2878	178.18	10.495	591.5
69	o-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	95476	106.167	0.69883	0.26113	630.33	0.27429	247.98	8.6285	630.33
70	m-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	108383	106.167	0.69355	0.26304	617.05	0.27602	238.30	8.6908	617.05
71	p-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106423	106.167	0.6816	0.25963	616.33	0.2768	236.41	8.616	616.33
72	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	100414	106.167	0.6952	0.26037	617.2	0.2844	178.15	9.0668	617.2
73	Propylbenzene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	103651	120.194	0.57695	0.25395	638.32	0.283	183.15	7.8942	638.32
74	1,2,4-Trimethylbenzene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	99636	120.194	0.60384	0.25955	649.13	0.27716	229.33	7.6895	649.13
75	Isopropylbenzene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	98828	120.194	0.604	0.25912	631.1	0.2914	177.14	7.9496	631.1
76	1,3,5-Trimethylbenzene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	108678	120.194	0.59879	0.25916	637.36	0.27968	228.42	7.6154	637.36
77	p-Isopropyltoluene	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	99876	134.221	0.51036	0.25353	653.15	0.28816	205.35	6.8779	653.15
78	Naphthalene <sup>2</sup>	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	91203	128.174	0.61674	0.25473	748.35	0.27355	333.15	7.7543	748.35
79	Biphenyl	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	92524	154.211	0.5039	0.25273	789.26	0.281	342.30	6.4395	789.26
80	Styrene	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	100425	104.152	0.7397	0.2603	636	0.3009	242.54	9.1088	636
81	m-Terphenyl	C <sub>18</sub> H <sub>14</sub>	93068	230.309	0.30826	0.23669	924.55	0.29678	360.00	4.5223	924.55
82	Methanol	CH <sub>3</sub> O	67561	32.042	2.388	0.2685	512.64	0.2453	175.47	27.912	512.64
83	Ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	64175	46.069	1.648	0.27627	513.92	0.2331	159.05	19.413	513.92
84	1-Propanol	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> O	71238	60.096	1.235	0.27136	536.78	0.24	146.85	15.231	536.78
85	1-Butanol	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O	71363	74.123	0.965	0.2666	563.05	0.24419	184.51	13.016	563.05
86	2-Butanol	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O	78922	74.123	0.966	0.26064	536.05	0.2746	156.45	13.57	536.05
87	2-Propanol	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> O	67630	60.096	1.34	0.27342	506.3	0.2353	185.38	14.547	506.3
88	2-Methyl-2-propanol	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O	76650	74.123	0.9212	0.2544	506.21	0.276	298.97	10.555	506.21
89	1-Pentanol	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> O	71410	88.150	0.8164	0.2673	586.15	0.2506	195.26	10.057	586.15
90	2-Methyl-1-butanol	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> O	137326	88.150	0.82046	0.26829	565	0.2322	203.00	10.017	565
91	3-Methyl-1-butanol	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> O	123513	88.150	0.837	0.27375	577.2	0.22951	155.85	10.204	577.2
92	1-Hexanol	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> O	111273	102.177	0.70617	0.26901	611.35	0.2479	228.55	8.4506	611.35
93	1-Heptanol	C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> O	111706	116.203	0.60481	0.2632	631.9	0.273	239.15	7.421	631.9
94	Cyclohexanol	C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> O	109930	100.161	0.8243	0.26546	650	0.2848	296.60	9.4693	650
95	Ethylene glycol	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	107211	62.068	1.3151	0.25125	719.7	0.2187	260.15	15.31	719.7
96	1,2-Propylene glycol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	57556	76.095	1.0923	0.26106	626	0.20459	213.15	14.363	626
97	Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O	109952	94.113	1.3798	0.31598	694.25	0.32768	314.06	11.244	694.25
98	o-Cresol	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> O	95487	106.140	1.0861	0.30624	697.55	0.30857	304.19	9.5751	697.55
99	m-Cresol	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> O	108394	106.140	0.9061	0.28358	705.55	0.2707	285.39	9.6115	705.55
100	p-Cresol	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> O	106445	106.140	1.1503	0.31861	704.65	0.30104	307.93	9.4494	704.65
101	Dimethyl ether	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	115106	46.069	1.5693	0.2679	400.1	0.2882	131.65	15.95	400.1
102	Methyl ethyl ether	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	540670	60.096	1.3635	0.27878	437.5	0.2744	160.00	13.995	437.5
103	Methyl n-propyl ether	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	557175	74.123	1.0124	0.27942	476.3	0.2555	133.97	11.696	476.3
104	Methyl isopropyl ether	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	598538	74.123	1.0318	0.26478	464.5	0.2444	127.93	11.568	464.5
105	Methyl n-butyl ether	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	628284	88.150	0.8281	0.27245	510	0.2827	157.48	9.8068	510
106	Methyl isobutyl ether <sup>1</sup>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	625445	88.150	0.8252	0.27282	497	0.2857	150.00	9.7673	497
107	Methyl tert-butyl ether	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	1634044	88.150	0.82157	0.27032	497.1	0.2839	164.55	9.7682	497.1
108	Diethyl ether	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	60297	74.123	0.9554	0.26847	466.7	0.2814	156.85	11.487	466.7

Tabla A.13.3. (Continuación 2)

Compd. no.	Name	Formula	CAS no.	Mol. wt.	C1	C2	C3	C4	T <sub>an</sub> , K	Density at T <sub>an</sub>	T <sub>an</sub> , K
109	Ethyl propyl ether	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	628320	88.150	0.7906	0.266	500.23	0.292	145.55	9.8474	500.23
110	Ethyl isopropyl ether	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	625547	88.150	0.82049	0.26994	489	0.30381	140.00	9.9117	489
111	Methyl phenyl ether	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	100663	106.140	0.77488	0.26114	645.6	0.28234	235.55	9.6673	645.6
112	Diphenyl ether	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> O	101848	170.211	0.52133	0.26218	766.8	0.31033	300.03	6.2648	766.8
113	Formaldehyde <sup>2</sup>	CH <sub>2</sub> O	50000	30.026	1.9415	0.22309	408	0.28571	181.15	30.945	408
114	Acetaldehyde	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	75070	44.053	1.6994	0.26167	466	0.2913	150.15	21.499	466
115	1-Propanal	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	123386	58.080	1.296	0.26439	504.4	0.29471	170.00	15.929	504.4
116	1-Butanal	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	123728	72.107	1.0361	0.26731	537.2	0.28397	176.75	12.589	537.2
117	1-Pentanal	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	110623	86.134	0.83871	0.26282	566.1	0.29444	182.00	10.334	566.1
118	1-Hexanal	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	66251	100.161	0.71899	0.26331	591	0.27628	217.15	8.7243	591
119	1-Heptanal	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	111717	114.185	0.62649	0.26376	617	0.29221	229.80	7.6002	617
120	1-Octanal	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	124130	128.214	0.56833	0.26939	638.1	0.26975	246.00	6.6637	638.1
121	1-Nonanal	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	124196	142.241	0.49587	0.26135	658	0.30736	255.15	6.0165	658
122	1-Decanal	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	112312	156.268	0.46802	0.27146	674.2	0.26869	267.15	5.3834	674.2
123	Acetone	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	67641	58.080	1.2322	0.28886	506.2	0.2913	178.45	15.683	506.2
124	Methyl ethyl ketone	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	78933	72.107	0.93767	0.29035	535.5	0.29664	186.48	12.663	535.5
125	2-Pentanone	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	107879	86.134	0.90411	0.27207	561.08	0.30669	196.29	10.398	561.08
126	Methyl isopropyl ketone <sup>1</sup>	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	563804	86.134	0.8374	0.26204	553	0.2857	181.15	10.565	553
127	2-Hexanone	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	581786	100.161	0.70699	0.26073	587.05	0.2963	217.35	8.7905	587.05
128	Methyl isobutyl ketone	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	108101	100.161	0.71791	0.26461	571.4	0.28544	189.15	8.8579	571.4
129	3-Methyl-2-pentanone <sup>1</sup>	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	565617	100.161	0.6969	0.2887	573	0.2857	167.15	9.1722	573
130	3-Pentanone	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	96220	86.134	0.71811	0.24129	560.95	0.27996	234.18	10.102	560.95
131	Ethyl isopropyl ketone	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	565695	100.161	0.66469	0.24527	567	0.34305	200.00	9.0633	567
132	Diisopropyl ketone	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	565800	114.185	0.56213	0.23385	576	0.2618	204.81	8.7779	576
133	Cyclohexanone	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	109941	98.145	0.8663	0.26941	653	0.2977	242.00	10.081	653
134	Methyl phenyl ketone	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	98562	120.151	0.64417	0.24963	709.5	0.28661	292.81	8.5261	709.5
135	Formic acid	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	64186	46.026	1.938	0.24225	588	0.24435	281.45	36.806	588
136	Acetic acid	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	64197	60.053	1.4496	0.25992	591.95	0.2529	289.81	17.492	591.95
137	Propionic acid	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	79094	74.079	1.1041	0.29659	600.81	0.26874	252.45	13.933	600.81
138	n-Butyric acid	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	107926	88.106	0.89213	0.29938	615.7	0.24909	267.95	11.067	615.7
139	Isobutyric acid	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	79312	88.106	0.88575	0.28736	605	0.26265	227.15	11.42	605
140	Benzoic acid <sup>1</sup>	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	65850	122.123	0.71587	0.24812	751	0.2857	395.45	8.8933	751
141	Acetic anhydride	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	108247	102.090	0.86852	0.28187	606	0.31172	200.15	11.643	606
142	Methyl formate	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	107313	60.053	1.525	0.2634	487.2	0.2806	174.15	18.811	487.2
143	Methyl acetate	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	79209	74.079	1.13	0.2993	506.55	0.2764	175.15	14.475	506.55
144	Methyl propionate	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	554121	88.106	0.9147	0.2994	530.6	0.2774	185.65	11.678	530.6
145	Methyl n-butyrate	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	623427	102.133	0.76983	0.26173	554.5	0.26879	187.35	9.7638	554.5
146	Ethyl formate	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	109944	74.079	1.1343	0.26168	508.4	0.2791	193.55	14.006	508.4
147	Ethyl acetate	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	141786	88.106	0.8996	0.28856	523.3	0.278	189.60	11.478	523.3
148	Ethyl propionate	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	105373	102.133	0.7405	0.28963	546	0.2798	199.25	9.6317	546
149	Ethyl n-butyrate	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	105544	116.160	0.63566	0.26613	571	0.27829	175.15	8.4912	571
150	n-Propyl formate	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	110747	88.106	0.915	0.26134	538	0.28	180.25	11.59	538
151	n-Propyl acetate	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	109604	102.133	0.73041	0.28456	549.73	0.27666	178.15	9.7941	549.73
152	n-Butyl acetate	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	123864	116.160	0.669	0.26028	579.15	0.309	199.65	8.3747	579.15
153	Methyl benzoate	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	93583	136.150	0.53944	0.23519	693	0.2676	260.75	8.2133	693
154	Ethyl benzoate	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	93590	150.177	0.4883	0.23878	698	0.28487	238.45	7.2924	698
155	Vinyl acetate	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	109054	86.090	0.9591	0.2993	519.13	0.27448	180.35	12.287	519.13
156	Methylamine	CH <sub>5</sub> N	74895	31.057	1.39	0.21405	430.05	0.2275	179.69	25.378	430.05
157	Dimethylamine	C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N	124403	45.094	1.5436	0.27794	437.2	0.2572	180.96	16.964	437.2
158	Trimethylamine	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	75503	59.111	1.0116	0.29683	433.25	0.2696	156.08	13.144	433.25
159	Ethylamine	C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N	75047	45.094	1.1477	0.23182	456.15	0.26083	192.15	17.588	456.15
160	Diethylamine	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	109897	73.138	0.85379	0.29675	496.6	0.27027	223.35	10.575	496.6

**Tabla A.13.4.**  
Propiedades de gases a diferentes temperaturas (Perry et al., 2001)

Substance	Thermal conductivity, W/(m·K) Temperature, K					Viscosity, 10 <sup>-4</sup> Pa·s Temperature, K					Prandtl number, dimensionless Temperature, K			
	250	300	400	500	600	250	300	400	500	600	250	300	400	500
Acetone	0.0080	0.0115	0.0201	0.0310			0.077	0.101	0.128	0.156				
Acetylene	0.0162	0.0213	0.0332	0.0452	0.0561		0.104	0.135	0.164					
Ammonia	0.0197	0.0246	0.0364	0.0506	0.0656	0.085	0.102	0.139	0.175	0.211		0.91	0.87	0.86
Argon	0.0152	0.0177	0.0223	0.0264	0.0301	0.195	0.229	0.289	0.343	0.390	0.669	0.668	0.666	0.663
Benzene	0.0077	0.0104	0.0195	0.0335	0.0524		0.076	0.101	0.127	0.154				
Bromine	0.0038	0.0048	0.0067					0.203	0.260	0.291				
Butane	0.0117	0.0160	0.0264	0.0377			0.076	0.101	0.125	0.151		0.805	0.820	
CO <sub>2</sub>	0.0129	0.0166	0.0244	0.0323	0.0403	0.126	0.150	0.196	0.239	0.278	0.793	0.778	0.752	0.734
CCl <sub>4</sub>	0.0053	0.0067	0.0099	0.0126			0.101	0.131	0.162	0.191				
Chlorine	0.0071	0.0089	0.0124	0.0156	0.0190		0.136	0.178	0.218	0.259				
Deuterium	0.122	0.141	0.176			0.111	0.126	0.153	0.178	0.201				
Ethane	0.0156	0.0218	0.0360	0.0516	0.0685	0.079	0.094	0.123	0.148	0.171	0.817	0.773	0.746	0.746
Ethylene	0.0152	0.0214	0.0342	0.0491	0.0653	0.087	0.103	0.135	0.162	0.187	0.812	0.796	0.769	0.750
Helium	0.134	0.150	0.180	0.211	0.247	0.176	0.199	0.243	0.284	0.322	0.671	0.668	0.663	0.661
Heptane	0.0082	0.0120	0.0214	0.0325	0.0447			0.080	0.099	0.116				
Hydrogen	0.156	0.182	0.221	0.256	0.291	0.090	0.090	0.109	0.126	0.143	0.71	0.71	0.71	0.71
Methane	0.0277	0.0343	0.0494	0.0671	0.0948	0.095	0.112	0.142	0.170	0.195	0.742	0.739	0.737	0.736
Nitrogen	0.0222	0.0260	0.0325	0.0386	0.0441	0.156	0.180	0.223	0.261	0.295	0.721	0.714	0.708	0.707
Oxygen	0.0225	0.0267	0.0343	0.0412	0.0480	0.179	0.207	0.258	0.306	0.348				
Pentane	0.0107	0.0152	0.0250	0.0362										
Propane	0.0129	0.0183	0.0295	0.0417		0.069	0.082	0.108	0.131		0.810	0.774	0.758	0.826
Propylene	0.0114	0.0168	0.0226	0.0430	0.0580	0.073	0.087	0.115	0.141		0.860	0.797	0.762	
R 11		0.0078	0.0119			0.094	0.110	0.144				0.814	0.761	
R 12	0.0072	0.0097	0.0151	0.0208		0.108	0.126	0.162			0.827	0.781	0.745	0.708
R 13	0.0091	0.0121	0.0185	0.0248		0.123	0.145	0.190			0.796	0.766	0.759	0.757
R 21		0.0088	0.0135	0.0181		0.100	0.115	0.154				0.779	0.773	
R 22	0.0080	0.0109	0.0170	0.0230	0.0290	0.109	0.129	0.168			0.820	0.771	0.760	
SO <sub>2</sub>	0.0078	0.0096	0.0143	0.0200	0.0256		0.129	0.175	0.217	0.256				

\*An approximate interpolation scheme is to plot the logarithm of the viscosity or the thermal conductivity versus the logarithm of the absolute temperature. At 250 K the viscosity of gaseous argon is to be read as  $1.95 \times 10^{-8}$  Pa·s = 0.0000195 N·s/m<sup>2</sup>.

**Tabla A.13.5.**  
Configuración cuadrada en intercambiadores de calor (Mendía Urquiola, 1994)

D <sub>i</sub> Carcasa		Tubos ¾ " P=1"				Tubos 1 " P=1 1/4"				Tubos 1 ¼ " P=1 9/16"			
		Número de pasos				Número de pasos				Número de pasos			
(in)	(cm)	1	2	4	6	1	2	4	6	1	2	4	6
8	20,3	26	20	20		16	14						
10	25,4	52	40	36		32	26	24		12	10		
12	30,5	76	66	66	60	45	40	38	36	24	22	18	16
13 1/4	33,7	90	82	76	70	56	52	48	44	30	30	22	22
15 1/4	38,7	124	116	108	108	76	68	68	64	40	37	35	31
17 1/4	43,9	166	158	150	142	112	96	90	82	53	51	48	44
19 1/4	48,9	220	204	192	188	132	128	122	116	73	71	64	56
21 1/4	54,0	270	246	240	234	166	158	152	148	90	86	82	78
23 1/4	59,1	324	308	302	292	208	192	184	184	112	108	102	96
25	63,5	394	370	356	346	252	238	226	222	135	127	123	115
27	68,6	460	432	420	408	288	278	268	260	160	151	145	140
29	73,7	526	480	488	456	328	300	294	288	188	178	174	166
31	78,8	640	600	580	560	398	380	358	358	220	209	202	193
33	83,8	718	688	676	648	460	432	420	414	252	244	238	226
35	88,9	824	760	766	748	515	456	454	472	287	275	256	258
37	94,0	914	888	866	838	574	562	544	532	322	311	304	293
39	99,0	1024	982	988	948	644	624	612	600	352	348	342	336

**Tabla A.13.6.**  
Características de los tubos de intercambiadores de calor (normas TEMA)

Tubo DE, plg	DWG	Espesor de la pared,	DI, plg	Area de flujo por tubo, plg <sup>2</sup>	Superficie por pie lin. pies <sup>2</sup>		Peso por pie lineal, lb, de acero
					Exterior	Interior	
$\frac{1}{2}$	12	0.109	0.282	0.0625	0.1309	0.0748	0.493
	14	0.083	0.334	0.0876		0.0874	0.403
	16	0.065	0.370	0.1076		0.0969	0.329
	18	0.049	0.402	0.127		0.1052	0.258
	20	0.035	0.430	0.145		0.1125	0.190
$\frac{3}{4}$	10	0.134	0.482	0.182	0.1963	0.1263	0.965
	11	0.120	0.510	0.204		0.1335	0.884
	12	0.109	0.532	0.223		0.1393	0.817
	13	0.095	0.560	0.247		0.1466	0.727
	14	0.083	0.584	0.268		0.1529	0.647
	15	0.072	0.606	0.289		0.1587	0.571
	16	0.065	0.620	0.302		0.1623	0.520
	17	0.058	0.634	0.314		0.1660	0.469
	18	0.049	0.652	0.334		0.1707	0.401
1	8	0.165	0.670	0.355	0.2618	0.1754	1.61
	9	0.148	0.704	0.389		0.1843	1.47
	10	0.134	0.732	0.421		0.1916	1.36
	11	0.120	0.760	0.455		0.1990	1.23
	12	0.109	0.782	0.479		0.2048	1.14
	13	0.095	0.810	0.515		0.2121	1.00
	14	0.083	0.834	0.546		0.2188	0.899
	15	0.072	0.856	0.576		0.2241	0.781
	16	0.065	0.870	0.594		0.2277	0.710
	17	0.058	0.884	0.613		0.2314	0.639
$1\frac{1}{4}$	18	0.049	0.902	0.639	0.3271	0.2361	0.545
	8	0.165	0.920	0.665		0.2409	2.09
	9	0.148	0.954	0.714		0.2498	1.91
	10	0.134	0.982	0.757		0.2572	1.75
	11	0.120	1.01	0.800		0.2644	1.58
	12	0.109	1.03	0.836		0.2701	1.45
	13	0.095	1.06	0.884		0.2775	1.28
	14	0.083	1.08	0.923		0.2839	1.13
	15	0.072	1.11	0.960		0.2896	0.991
	16	0.065	1.12	0.985		0.2932	0.900
$1\frac{1}{2}$	17	0.058	1.13	1.01	0.3925	0.2969	0.808
	18	0.049	1.15	1.04		0.3015	0.688
	8	0.165	1.17	1.075		0.3063	2.57
	9	0.148	1.20	1.14		0.3152	2.34
	10	0.134	1.23	1.19		0.3225	2.14
	11	0.120	1.26	1.25		0.3299	1.98
	12	0.109	1.28	1.29		0.3356	1.77
	13	0.095	1.31	1.35		0.3430	1.56
	14	0.083	1.33	1.40		0.3492	1.37
	15	0.072	1.36	1.44		0.3555	1.20
2	16	0.065	1.37	1.47	0.3925	0.3587	1.09
	17	0.058	1.38	1.50		0.3623	0.978
	18	0.049	1.40	1.54		0.3670	0.831



**Tabla A.13.7.**  
Características de conducciones (normas ANSI)

Tamaño nominal, diámetro externo (in.)	Número de lista (Sch.)			Espesor de pared (in.)	Diámetro interno (in.)	Área de flujo (in <sup>2</sup> )	Área de la sección (metal) (in <sup>2</sup> )	Superficie externa (pie <sup>2</sup> /pie)	Superficie interna (pie <sup>2</sup> /pie)	Peso por pie (lb.)	Peso del agua por pie (lb.)	Momento de inercia (in <sup>4</sup> )	Módulo resistente (in <sup>3</sup> )	Radio de giro (in.)
	a	b	c											
$\frac{1}{8}$ 0.405	—	—	10S	0.049	0.307	0.0740	0.0548	0.106	0.0804	0.186	0.0321	0.00088	0.00437	0.1271
	40	Std	40S	0.068	0.269	0.0568	0.0720	0.106	0.0705	0.245	0.0246	0.00106	0.00525	0.1215
	80	XS	80S	0.095	0.215	0.0364	0.0925	0.106	0.0563	0.315	0.0157	0.00122	0.00600	0.1146
$\frac{1}{4}$ 0.540	—	—	10S	0.065	0.419	0.1320	0.0970	0.141	0.1073	0.330	0.0572	0.00279	0.01032	0.1691
	40	Std	40S	0.083	0.364	0.1041	0.1250	0.141	0.0955	0.425	0.0451	0.00331	0.01230	0.1628
	80	XS	80S	0.119	0.302	0.0716	0.1574	0.141	0.0794	0.535	0.0310	0.00378	0.01395	0.1547
$\frac{3}{8}$ 0.675	—	—	10S	0.065	0.545	0.2333	0.1246	0.177	0.1427	0.423	0.1011	0.00586	0.01737	0.2160
	40	Std	40S	0.091	0.493	0.1910	0.1670	0.177	0.1295	0.568	0.0827	0.00730	0.02160	0.2090
	80	XS	80S	0.120	0.423	0.1405	0.2173	0.177	0.1106	0.739	0.0609	0.00862	0.02554	0.1991
$\frac{1}{2}$ 0.840	—	—	10S	0.083	0.674	0.357	0.1974	0.220	0.1765	0.071	0.1547	0.01431	0.0341	0.2692
	40	Std	40S	0.109	0.622	0.304	0.2503	0.220	0.1628	0.851	0.1316	0.01710	0.0407	0.2613
	80	XS	80S	0.147	0.546	0.2340	0.320	0.220	0.1433	1.088	0.1013	0.02010	0.0478	0.2505
	160	—	—	0.187	0.466	0.1706	0.383	0.220	0.1220	1.304	0.0740	0.02213	0.0527	0.2400
	—	XXS	—	0.294	0.252	0.0499	0.504	0.220	0.0660	1.714	0.0216	0.02425	0.0577	0.211
$\frac{3}{4}$ 1.050	—	—	5S	0.065	0.920	0.865	0.2011	0.275	0.2409	0.684	0.2882	0.02451	0.0467	0.349
	—	—	10S	0.083	0.884	0.614	0.2521	0.275	0.2314	0.857	0.2661	0.02970	0.0566	0.343
	40	Std	40S	0.113	0.824	0.533	0.333	0.275	0.2157	1.131	0.2301	0.0370	0.0706	0.334
	80	XS	80S	0.154	0.742	0.432	0.435	0.275	0.1943	1.474	0.1875	0.0448	0.0853	0.321
	160	—	—	0.218	0.614	0.2961	0.570	0.275	0.1607	1.937	0.1284	0.0527	0.1004	0.304
1 1.315	—	—	—	0.308	0.434	0.1479	0.718	0.275	0.1137	2.441	0.0641	0.0579	0.1104	0.2840
	—	—	5S	0.065	1.185	1.103	0.2553	0.344	0.310	0.808	0.478	0.0500	0.0760	0.443
	—	—	10S	0.109	1.097	0.945	0.413	0.344	0.2872	1.404	0.400	0.0757	0.1151	0.428
	40	Std	40S	0.133	1.049	0.864	0.404	0.344	0.2746	1.679	0.374	0.0874	0.1329	0.421
	80	XS	80S	0.179	0.957	0.719	0.639	0.344	0.2520	2.172	0.311	0.1056	0.1605	0.407
$1\frac{1}{4}$ 1.600	—	—	—	0.250	0.815	0.522	0.836	0.344	0.2134	2.844	0.2261	0.1252	0.1903	0.387
	—	—	—	0.358	0.599	0.2818	1.076	0.344	0.1570	3.659	0.1221	0.1405	0.2137	0.361
	—	—	5S	0.065	1.530	1.830	0.326	0.434	0.401	1.107	0.797	0.1038	0.1250	0.564
	—	—	10S	0.109	1.442	1.633	0.531	0.434	0.378	1.805	0.707	0.1605	0.1934	0.550
	40	Std	40S	0.140	1.380	1.496	0.669	0.434	0.361	2.273	0.648	0.1948	0.2346	0.540
$1\frac{1}{2}$ 1.900	80	XS	80S	0.191	1.278	1.283	0.881	0.434	0.335	2.997	0.555	0.2418	0.2913	0.524
	160	—	—	0.250	1.160	1.057	1.107	0.434	0.304	3.765	0.458	0.2839	0.342	0.506
	—	XXS	—	0.382	0.896	0.631	1.534	0.434	0.2346	5.214	0.2732	0.341	0.411	0.472
$1\frac{1}{2}$ 1.900	—	—	5S	0.065	1.770	2.461	0.375	0.497	0.463	1.274	1.067	0.1580	0.1663	0.649
	—	—	10S	0.109	1.682	2.222	0.613	0.497	0.440	2.085	0.902	0.2409	0.2599	0.634



Tabla A.13.7. (Continuación)

Tamaño nominal, diámetro exterior (in)	Número de listos (Sch.)			Espesor de pared (in)	Diámetro interno (in)	Área de flujo (in <sup>2</sup> )	Área de la sección (metal) (in <sup>2</sup> )	Superficie externa (pie <sup>2</sup> /pie)	Superficie interna (pie <sup>2</sup> /pie)	Peso por pie (lb.)	Peso del agua por pie (lb.)	Momento de inercia (in <sup>4</sup> )	Módulo resistente (in <sup>3</sup> )	Radio de giro (in)
	a	b	c											
1 1/2 1.500	40	Std	40S	0.145	1.610	2.036	0.799	0.497	0.421	2.718	0.882	0.310	0.326	0.623
	80	XS	80S	0.200	1.500	1.767	1.068	0.497	0.365	3.631	0.765	0.391	0.412	0.606
	160	—	—	0.281	1.338	1.406	1.429	0.497	0.350	4.859	0.608	0.483	0.508	0.581
	—	XXS	—	0.400	1.100	0.950	1.885	0.497	0.288	5.403	0.412	0.568	0.598	0.549
2 2.375	—	—	5S	0.065	2.245	3.96	0.472	0.622	0.568	1.604	1.716	0.315	0.2652	0.817
	—	—	10S	0.109	2.157	3.05	0.776	0.622	0.565	2.638	1.582	0.499	0.420	0.802
	40	Std	40S	0.154	2.067	3.36	1.075	0.622	0.541	3.653	1.455	0.666	0.561	0.787
	80	XS	80S	0.218	1.938	2.953	1.477	0.622	0.508	5.022	1.280	0.869	0.731	0.766
2 1/2 2.625	160	—	—	0.343	1.689	2.340	2.190	0.622	0.442	7.444	0.971	1.163	0.979	0.729
	—	XXS	—	0.438	1.503	1.774	2.656	0.622	0.393	9.020	0.760	1.312	1.104	0.703
	—	—	5S	0.083	2.709	5.76	0.728	0.753	0.709	2.475	2.499	0.710	0.494	0.988
	—	—	10S	0.120	2.635	5.45	1.039	0.753	0.690	3.531	2.361	0.988	0.687	0.975
3 3.500	40	Std	40S	0.203	2.468	4.79	1.704	0.753	0.646	5.793	2.076	1.530	1.064	0.9
	80	XS	80S	0.276	2.323	4.34	2.254	0.753	0.608	7.661	1.837	1.926	1.339	0.8
	160	—	—	0.375	2.125	3.55	2.945	0.753	0.550	10.01	1.535	2.353	1.637	0.894
	—	XXS	—	0.552	1.771	2.464	4.63	0.753	0.464	13.70	1.067	2.872	1.908	0.844
3 1/2 3.688	—	—	5S	0.093	3.334	8.73	0.891	0.916	0.873	3.03	3.78	1.301	0.744	1.208
	—	—	10S	0.120	3.260	8.35	1.274	0.916	0.853	4.33	3.61	1.822	1.041	1.196
	40	Std	40S	0.216	3.068	7.39	2.228	0.916	0.803	7.58	3.20	3.02	1.724	1.164
	80	XS	80S	0.300	2.900	6.61	3.02	0.916	0.759	10.25	2.864	3.90	2.228	1.136
4 4.500	160	—	—	0.437	2.626	5.42	4.21	0.916	0.687	14.32	2.348	5.03	2.876	1.094
	—	XXS	—	0.600	2.300	4.15	5.47	0.916	0.602	18.48	1.801	5.99	3.43	1.047
	—	—	5S	0.083	3.834	11.55	1.021	1.047	1.004	3.47	5.01	1.900	0.980	1.385
	—	—	10S	0.120	3.760	11.10	1.463	1.047	0.964	4.97	4.81	2.756	1.378	1.372
4 1/2 4.688	40	Std	40S	0.226	3.418	9.89	2.680	1.047	0.929	9.11	4.28	4.79	2.394	1.337
	80	XS	80S	0.318	3.364	8.80	3.68	1.047	0.881	12.61	3.85	6.28	3.14	1.301
	—	—	5S	0.093	4.334	14.75	1.152	1.178	1.135	3.92	6.40	2.811	1.249	1.563
	—	—	10S	0.120	4.260	14.25	1.651	1.178	1.115	5.61	6.17	3.86	1.762	1.549
5 5.563	40	Std	40S	0.237	4.026	12.73	2.17	1.178	1.054	10.70	5.51	7.23	2.21	1.610
	80	XS	80S	0.337	3.826	11.50	4.41	1.178	1.002	14.98	4.96	9.61	4.27	1.477
	120	—	—	0.437	3.626	10.33	5.58	1.178	0.949	18.96	4.48	11.65	5.18	1.445
	160	—	—	0.531	3.438	9.28	6.62	1.178	0.909	22.51	4.02	13.27	5.90	1.416
6 6.625	—	XXS	—	0.674	3.152	7.80	8.16	1.178	0.825	27.54	3.38	15.29	6.79	1.374
	—	—	5S	0.109	5.345	22.44	1.868	1.456	1.399	6.85	9.73	6.95	2.498	1.929
	—	—	10S	0.134	5.295	22.02	2.285	1.456	1.336	7.77	9.53	8.43	3.03	1.9
	40	Std	40S	0.258	5.047	20.01	4.30	1.456	1.321	14.62	8.66	15.17	5.45	1.8
7 7.625	80	XS	80S	0.375	4.813	18.19	6.11	1.456	1.260	20.78	7.89	20.68	7.43	1.539
	120	—	—	0.500	4.563	16.30	7.95	1.456	1.195	27.04	7.09	23.74	9.25	1.799
	160	—	—	0.625	4.313	14.61	9.70	1.456	1.129	32.96	6.33	30.0	10.80	1.760
	—	XXS	—	0.750	4.063	12.97	11.34	1.456	1.064	38.55	5.62	33.6	12.10	1.722
8 8.625	—	—	5S	0.109	6.407	32.2	2.231	1.734	1.677	5.37	13.98	11.85	3.58	2.304
	—	—	10S	0.134	6.357	31.7	2.733	1.734	1.664	9.29	13.74	14.40	4.35	2.295
	40	Std	40S	0.280	6.065	28.89	5.68	1.734	1.588	18.97	12.51	28.14	6.50	2.245
	80	XS	80S	0.432	5.761	26.07	8.40	1.734	1.508	29.57	11.29	40.5	12.23	2.195
9 9.625	120	—	—	0.562	5.501	23.77	10.70	1.734	1.440	36.39	10.30	49.6	14.98	2.153
	160	—	—	0.718	5.189	21.15	13.33	1.734	1.358	45.30	9.16	59.0	17.81	2.104
	—	XXS	—	0.884	4.887	18.83	16.64	1.734	1.292	53.16	8.17	66.3	20.03	2.060
	—	—	5S	0.109	8.407	55.5	2.656	2.258	2.201	9.91	24.07	25.45	6.13	3.01
10 10.625	—	—	10S	0.148	8.359	54.5	3.94	2.258	2.180	13.40	23.59	35.4	8.21	3.00
	20	—	—	0.550	8.125	51.8	6.58	2.258	2.127	22.36	22.51	57.7	13.39	2.982
	30	—	—	0.777	8.071	51.2	7.26	2.258	2.113	24.79	22.18	63.4	14.69	2.953
	40	Std	40S	0.332	7.851	50.2	8.40	2.258	2.089	28.55	21.69	72.6	16.84	2.938
11 11.625	60	—	—	0.466	7.613	47.0	10.48	2.258	2.045	35.64	20.79	88.8	20.59	2.909
	80	XS	80S	0.609	7.325	43.7	13.76	2.258	1.998	43.39	19.89	105.7	24.52	2.878

**Tabla A.13.8.**

Tolerancia de metales a diferentes sustancias (Ingeniería Química, 2002)

Sustancia	Acero Inox. 316	Acero Inox. 347	Acero Inox. Carpenter 20	Hastelloy B o C
Benceno	A	A	A	A
Cloruro cálcico	C	C	A	A
Formaldehído	C	C	A	A
Bromo	X	X	C	A
Agua potable	A	A	A	A

Clasificación por resistencia: A: Bueno. B: Regular. C: Precaución. X: No se usa.

**Tabla A.13.9.**

Tensiones máximas admisibles para metales (código ASME Sección II)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec No.	Type/Grade	Alloy Desig./UNS No.	Class/Cond./Temper	Size/Thickness, in.	P-No.	Group No.
1	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316H	S31609	---	> 5	8	1
2	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316H	S31609	---	> 5	8	1
3	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-336	F316H	S31609	---	---	8	1
4	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-336	F316H	S31609	---	---	8	1
5	16Cr-12Ni-2Mo	Forged pipe	SA-430	FP316H	S31609	---	---	8	1
6	16Cr-12Ni-2Mo	Forged pipe	SA-430	FP316H	S31609	---	---	8	1
7	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316	S31600	---	≤ 5	8	1
8	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316	S31600	---	≤ 5	8	1
9	16Cr-12Ni-2Mo	Smis. tube	SA-213	TP316	S31600	---	---	8	1
10	16Cr-12Ni-2Mo	Smis. tube	SA-213	TP316	S31600	---	---	8	1
11	16Cr-12Ni-2Mo	Plate	SA-240	316	S31600	---	---	8	1

Line No.	Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding														
	-20 to 100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	
1	20.0	---	20.0	---	19.4	19.2	18.0	17.0	16.6	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6	
2	20.0	---	17.3	---	15.6	14.3	13.3	12.6	12.3	12.1	11.9	11.8	11.6	11.5	
3	20.0	---	20.0	---	19.4	19.2	18.0	17.0	16.6	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6	
4	20.0	---	17.3	---	15.6	14.3	13.3	12.6	12.3	12.1	11.9	11.8	11.6	11.5	
5	20.0	---	20.0	---	19.4	19.2	18.0	17.0	16.6	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6	
6	20.0	---	17.3	---	15.6	14.3	13.3	12.6	12.3	12.1	11.9	11.8	11.6	11.5	
7	20.0	---	20.0	---	20.0	19.3	18.0	17.0	16.6	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6	
8	20.0	---	17.3	---	15.6	14.3	13.3	12.6	12.3	12.1	11.9	11.8	11.6	11.5	
9	20.0	---	20.0	---	20.0	19.3	18.0	17.0	16.6	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6	
10	20.0	---	17.3	---	15.6	14.3	13.3	12.6	12.3	12.1	11.9	11.8	11.6	11.5	
11	20.0	---	20.0	---	20.0	19.3	18.0	17.0	16.6	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6	

**Tabla A.13.10.**  
Propiedades del acero Carpenter 20 Mo-6

**Carpenter 20-Mo6® Stainless Steel, Tensile Properties at 93°C**

<b>Categories:</b>	<a href="#">Metal</a> ; <a href="#">Ferrous Metal</a> ; <a href="#">Stainless Steel</a>
<b>Material Notes:</b>	<p>Data provided by Carpenter Technology Corporation.</p> <p>This is an austenitic stainless steel which is resistant to corrosion in hot chloride environments with low pH. It has good resistance to pitting, crevice corrosion and stress-corrosion cracking in chloride environments and is also resistant to oxidizing media. The alloy is designed for applications where better pitting and crevice-corrosion resistance are required than 20Cr-30 stainless offers.</p> <p>20-Mo6® is a registered trademark of Carpenter Technology Corporation.</p>
<b>Key Words:</b>	UNS N08026, Carpenter Technology Corporation, Carpenter Steel Division; Cartech
<b>Vendors:</b>	No vendors are listed for this material. Please <a href="#">click here</a> if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	8.133 g/cc	0.2938 lb/in³	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	600 MPa	87000 psi	
	448 MPa	65000 psi	
	@Temperature 593 °C	@Temperature 1100 °F	
	462 MPa	67000 psi	
	@Temperature 538 °C	@Temperature 1000 °F	
	490 MPa	71100 psi	
	@Temperature 482 °C	@Temperature 900 °F	
	496 MPa	71900 psi	
	@Temperature 427 °C	@Temperature 801 °F	
	510 MPa	74000 psi	
	@Temperature 371 °C	@Temperature 700 °F	
	517 MPa	75000 psi	
	@Temperature 316 °C	@Temperature 601 °F	
	531 MPa	77000 psi	
	@Temperature 260 °C	@Temperature 500 °F	
	545 MPa	79000 psi	
	@Temperature 204 °C	@Temperature 399 °F	
	572 MPa	83000 psi	
	@Temperature 149 °C	@Temperature 300 °F	
Tensile Strength, Yield	283 MPa	41000 psi	0.2% Offset
	186 MPa	27000 psi	0.2% Offset
	@Temperature 538 °C	@Temperature 1000 °F	
	186 MPa	27000 psi	0.2% Offset
	@Temperature 593 °C	@Temperature 1100 °F	
	193 MPa	28000 psi	0.2% Offset
	@Temperature 482 °C	@Temperature 900 °F	
	200 MPa	29000 psi	0.2% Offset
	@Temperature 371 °C	@Temperature 700 °F	
	200 MPa	29000 psi	0.2% Offset
	@Temperature 427 °C	@Temperature 801 °F	
	214 MPa	31000 psi	0.2% Offset
	@Temperature 316 °C	@Temperature 601 °F	
	234 MPa	33900 psi	0.2% Offset
	@Temperature 260 °C	@Temperature 500 °F	
	255 MPa	37000 psi	0.2% Offset
	@Temperature 204 °C	@Temperature 399 °F	
	262 MPa	38000 psi	0.2% Offset
	@Temperature 149 °C	@Temperature 300 °F	
Specific Heat Capacity	0.450 J/g·°C	0.108 BTU/lb·°F	
Thermal Conductivity	12.1 W/m·K	84.0 BTU-in/hr·ft²·°F	at 50°C. 14.8 W/m·K at 200°C. 18.2 W/m·K at 400°C

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	<= 0.030 %	<= 0.030 %	
Chromium, Cr	22.0 - 26.0 %	22.0 - 26.0 %	
Copper, Cu	2.0 - 4.0 %	2.0 - 4.0 %	
Iron, Fe	31.0 %	31.0 %	as remainder
Manganese, Mn	<= 1.0 %	<= 1.0 %	
Molybdenum, Mo	5.0 - 6.70 %	5.0 - 6.70 %	
Nickel, Ni	33.0 - 37.0 %	33.0 - 37.0 %	
Phosphorous, P	<= 0.030 %	<= 0.030 %	
Silicon, Si	<= 0.50 %	<= 0.50 %	
Sulfur, S	<= 0.030 %	<= 0.030 %	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

**Tabla A.13.11.**

Velocidades típicas de gases (Branan, Carl R., 3ª Edición)

Typical Design Vapor Velocities* (ft./sec.)			
Fluid	Line Sizes		
	≤6"	8"-12"	≥14"
Saturated Vapor			
0 to 50 psig	30-115	50-125	60-145
Gas or Superheated Vapor			
0 to 10 psig	50-140	90-190	110-250
11 to 100 psig	40-115	75-165	95-225
101 to 900 psig	30-85	60-150	85-165

*\*Values listed are guides, and final line sizes and flow velocities must be determined by appropriate calculations to suit circumstances. Vacuum lines are not included in the table, but usually tolerate higher velocities. High vacuum conditions require careful pressure drop evaluation.*

**Tabla A.13.12.**

Velocidades típicas de proceso (Branan, Carl R., 3ª Edición)

Servicio	Velocidad (ft/s)
Líquido de proceso	4-6,5
Succión de una bomba (excepto calentamiento)	1-5
Succión de una bomba (calentamiento)	0,5-3
Agua de alimentación a caldera	4-8
Conducciones de purga	1,5-4

**Tabla A.13.12. (Continuación)**

Velocidades típicas de proceso (Branan, Carl R., 3ª Edición)

Servicio	Velocidad (ft/min)
Chimeneas	2000
Líneas de agua (máx.)	600
Conducciones de vapor a alta presión	10000
Conducciones de vapor a baja presión	12000-15000
Conducciones de vapor a vacío	25000
Conducciones de aire comprimido	2000
Refrigerante líquido	200
Conductos de ventilación	1200-3000

**Tabla A.13.13.**

Valores del coeficiente Y (código ASME B.31.3)

Materiales	Temperatura °C (°F)					
	485 (900) o más bajo	510 (950)	540 (1000)	560 (1050)	595 (1100)	620 (1150) o más alto
Aceros ferríticos	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7
Aceros austeníticos	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7
Otros metales dúctiles	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Hierro fundido	0,0	-	-	-	-	-

**Tabla A.13.14.**

Tipos de juntas soldadas (Megyesy, E.F., 2001)

TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS					
TIPOS NORMA UW-12		EFICIENCIA DE LA JUNTA, E			Cuando la junta es:
		a. Radiografiada totalmente	b. Examinada por zonas	c. No Examinada	
1	 <p>Junta a tope buchas por doble cordón de soldadura con un medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies interior y exterior de la placa. Si se emplea placa de espesor, debe quitarse ésta después de terminar la soldadura.</p>	1.00	0.85	0.70	
2	 <p>Junta a tope de un solo cordón con tira de respaldos que queda en su lugar después de soldar.</p>	0.90	0.80	0.65	
3	 <p>Junta a tope de un solo cordón sin tira de respaldos.</p>	—	—	0.60	
4	 <p>Junta a traslape de doble filete completa.</p>	—	—	0.55	
5	 <p>Junta a traslape de un solo filete con refuerzo con soldaduras de repén.</p>	—	—	0.50	
6	 <p>Junta a traslape de un solo filete completa sin soldaduras de repén.</p>	—	—	0.45	

**Tabla A.13.15.**

Factor  $q_s$  carga por viento (Megyesy, E.F., 2001)

Velocidad básica del viento, mph	70	80	90	100	110	120	130
Presión $q_s$ , lb/pie <sup>2</sup>	13	17	21	26	31	37	44

**Tabla A.13.16.**

Factor  $C_e$  carga por viento (Megyesy, E.F., 2001)

Altura sobre el piso, pies	Coeficiente $C_e$	
	Exposición C	Exposición B
0- 20	1.2	0.7
20- 40	1.3	0.8
40- 60	1.5	1.0
60-100	1.6	1.1
100-150	1.8	1.3
150-200	1.9	1.4
200-300	2.1	1.6
300-400	2.2	1.8

**Tabla A.13.17.**

Factor  $C_q$  carga por viento (Megyesy, E.F., 2001)

$C_q$ = Coeficiente de presión (factor de forma):	
Torres cuadradas o rectangulares.....	1.4
Torres hexagonales u octagonales.....	1.1
Torres redondas o elípticas.....	0.8
(Si hay cualquier equipo conectado a la torre, se recomienda incrementar $C_q$ hasta 0.9 para recipientes cilíndricos.)	

**Tabla A.13.18.**

Espesor calorifugado de equipos (Especificaciones Cepsa)

TEMPERATURA DE OPERACIÓN °C	ESPESOR mm.
65 - 75	40
75 - 160	50
160 -180	60
180 - 310	80
310 - 450	120
450 - 650	150
650 - 750	180

**Tabla A.13.19.**  
Espesor calorifugado de conducciones (Especificaciones Cepsa)

DIÁMETRO NOMINAL	TEMPERATURA DE OPERACIÓN °C.					
	65-200	200-300	300-400	400-550	550-650	650-800
Menores de 2"	30	40	60	60	60	60
2"	30	40	60	70	70	80
3"	30	50	70	80	90	100
4"	40	60	70	90	100	120
6"	40	60	90	110	120	140
8"	40	70	90	110	130	140
10"	50	70	100	130	140	150
12"	50	70	100	130	150	160
14"	50	80	110	130	150	160
16"	60	80	110	140	150	180
18"	60	90	120	150	180	190
20"	60	90	120	160	180	190
24"	60	100	140	170	180	200

**Tabla A.13.20.**  
Longitudes equivalentes de accesorios (Rase H.F., 1963)

Pérdidas en codos y accesorios (longitud equivalente de tubería recta, en pies)														
Diámetro interior (in)	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	24
Codo de 90°	2-2,5	4-5	6-7	9-10	10-11	12-14	18	27	26	31	35	40	45	52
Codo largo de 90°	1,5-2	2,5-4	5	6-7	7-8	9-11	12-14	16-17	20	23	27	30	34	40
Codo de 45°	1,5	2,5	3,5	4,5	6	7,5	10	12,5	15	17	19	21	23	28
Codo largo de 45°	1	1,5	2	2,7	3,5	4	5	6	7	9	10	12	14	16
Curva de 180°						36	46	60	75					
Curva de 180°, gran radio						20	25	30	40					
Curvas de 90° Soldadas														
0,5		7	10	12	15	19	25	32	38	44	50	56		
1		3	5	6	7	8	11	14	17	20	23	26		
1,5		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18		
2		1	2	3	3,5	4	6	8	10	12	14	16		
3		1	1,5	2,5	3	4	6	7	9	11	13	15		
Tes	5,5	10	15	20	25	32	41	55	65	75	85	100	115	130
V. de compuerta abierta	0,6	1,25	1,7	2,3	2,9	3,5	4,5	6	7	8	9	10	12	14
cerrada 1/4		7	10	13	16	19	26	33	40					
cerrada 1/2		33	50	70	85	100	130	160	190					
cerrada 3/4		140	200	280	340	400	540	700	800					
Válvula esférica	27	56	80	107	133	160	215	270	320	375	430	480	540	600
Válvula de retención	7	13	20	27	33	40	53	67	80	93	107	120	135	160
Válvula de pie	2	4	6	8	10	12	16	20	24	28	32	36	40	48
Colador	4	5	6	8	10	11	13	16	18	21	24	30	35	40
Entrada típica	1,5	3	4,5	6	7,5	9	12	15	18	21	24	27	30	35

**Tabla A.13.20. (Continuación)**

<b>Codos</b>	<b>K</b>	<b>L<sub>eq</sub>/D</b>
Codo de radio corto	0,9	32
Codo de radio medio	0,75	27
Codo de radio largo	0,60	20
Codo de 45°	0,42	15
<b>Otros accesorios</b>	<b>K</b>	<b>L<sub>eq</sub>/D</b>
Válvula de globo, completamente abierta	10	350
Válvula de ángulo, completamente abierta	5	175
Válvula de compuerta		
- Completamente abierta	0,19	7
- entreabierta	2,06	72
Empalme en T normal	1,8	67

**Tabla A.13.21.**

Conductividad térmica de metales (Perry et al., 2001)

$$k = \text{Btu}/(\text{h}\cdot\text{ft}^2)(^\circ\text{F}/\text{ft})$$

American Iron and Steel Institute Type No.	<i>k</i> at 212°F	<i>k</i> at 932°F
301, 302, 302B, 303, 304, 316†	9.4	12.4
308	8.8	12.5
309, 310	8.0	10.8
321, 347	9.3	12.8
403, 406, 410, 414, 416†	14.4	16.6
430, 430F†	15.1	15.2
442	12.5	14.2
501, 502†	21.2	19.5

\* Table 3-322 is based on information from manufacturers.

† Shelton and Swanger (National Bureau of Standards), *Trans. Am. Soc. Steel Treat.*, 21, 1061–1078 (1933).



**Tabla A.13.22.**  
Propiedades de diferentes rellenos (Peters & Timmerhaus, 1991)

Packing	Nominal size, in.	Approximate average weight per ft <sup>3</sup> of tower volume, lb	Approximate average total surface area of packing, ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup> of tower volume	Percent free-gas space = $\epsilon \times 100$	Packing factor, $a_p/\epsilon^3$ , effective surface area/(void fraction) <sup>3</sup> , ft <sup>2</sup> per ft <sup>3</sup> of tower volume (dry-packed values for use with Fig. 16-20)
Random packings:					
Stoneware	$\frac{1}{4}$	46	240	73	768
Raschig rings	$\frac{3}{8}$	51	134	68	494
	$\frac{1}{2}$	50	122	64	517
	$\frac{3}{4}$	44	80	73	199
	1	40	58	73	150
	$1\frac{1}{2}$	42	35	68	108
	2	37	28	74	46
	3	40	19	74	
Carbon Raschig rings	$\frac{1}{2}$	27	114	74	373
	1	27	57	74	170
	$1\frac{1}{2}$	34	38	67	92
	2	27	29	74	56
Steel Raschig rings (wall thickness = $\frac{1}{16}$ in.)	$\frac{1}{2}$	132	118	73	
	1	73	57	85	
	2	38	31	92	
Lessing rings (porcelain)	1	50	69	66	
	$\frac{1}{2}$	58	40	60	
	2	49	32	68	
Intalox saddles (porcelain)	$\frac{1}{2}$	34	190	78	
	1	34	78	78	100
	$1\frac{1}{2}$	30	60	81	52
Berl saddles (porcelain)	$\frac{1}{4}$	56	274	58	4225
	$\frac{1}{2}$	54	155	60	574
	1	45	79	69	229
	$1\frac{1}{2}$	38	52	70	79
Pall rings (steel)	$\frac{5}{8}$	37	104	93	70
	1	30	63	94	48
	$1\frac{1}{2}$	26	39	95	28
	2	24	31	96	20
Pall rings (polypropylene)	$\frac{5}{8}$	$7\frac{1}{2}$	104	87	97
	1	$5\frac{1}{2}$	63	90	52
	$1\frac{1}{2}$	$4\frac{3}{4}$	39	91	32
	2	$4\frac{1}{2}$	31	92	25
Stacked packings (stacked for maximum surface area per unit of tower volume):					
Raschig rings	2		32	80	
Cross-partition	$4 \times 4 \times \frac{3}{8}$	81	32	53	
Rings (porcelain)	$6 \times 6 \times \frac{5}{8}$	70	21	48	

**Tabla A.13.23.**

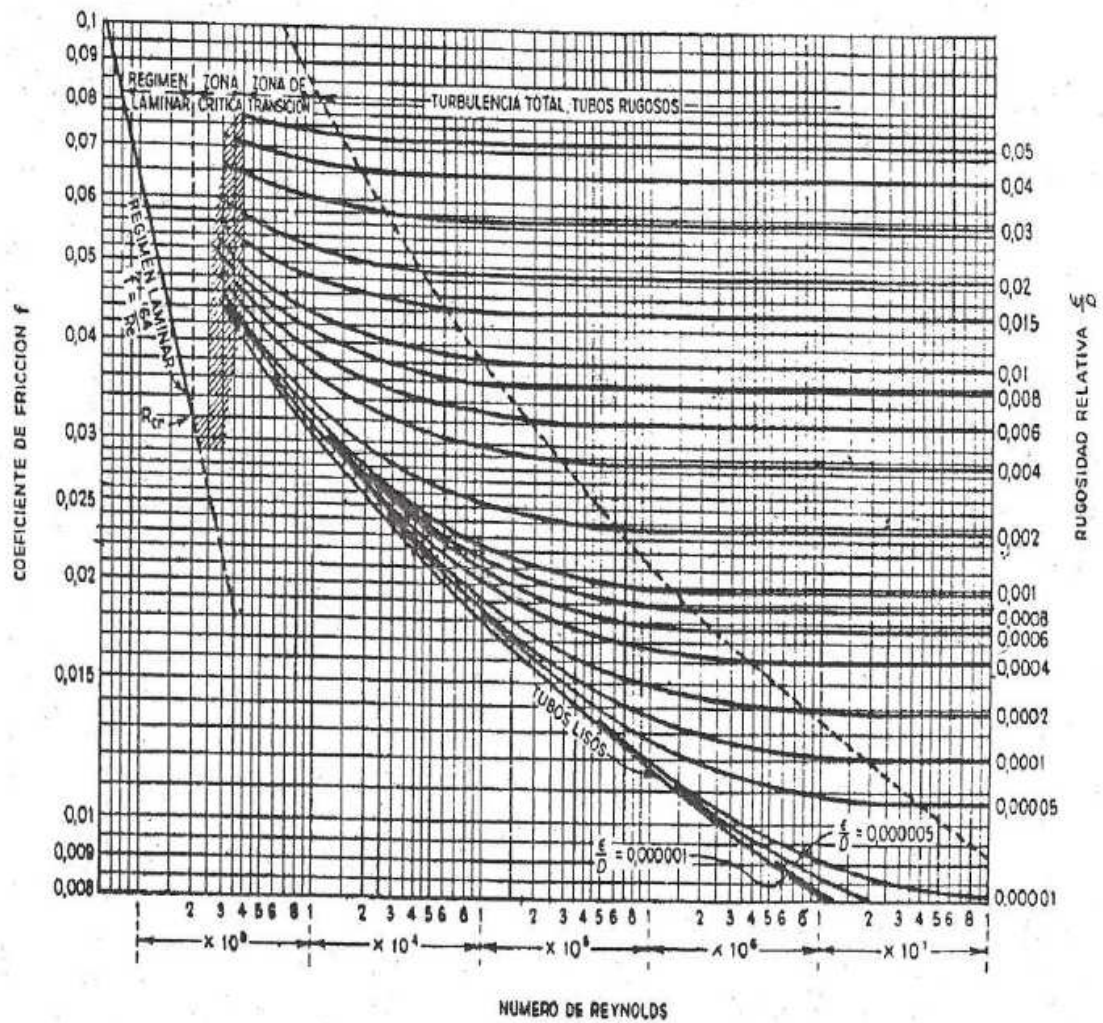
Constantes para la determinación de  $\Delta P$  en rellenos (Peters & Timmerhaus, 1991)

Packing	Nominal size, in.	$\gamma \times 10^8$	$\Phi \times 10^3$
Raschig rings	$\frac{1}{8}$	139	7.2
	$\frac{3}{8}$	33	4.5
	1	32	4.3
	$1\frac{1}{2}$	12	4.0
	2	11	2.3
Berl saddles	$\frac{1}{2}$	60	3.4
	$\frac{3}{4}$	24	3.0
	1	16	3.0
	$1\frac{1}{2}$	8	2.3
Intalox saddles	1	12	2.8
	$1\frac{1}{2}$	6	2.3

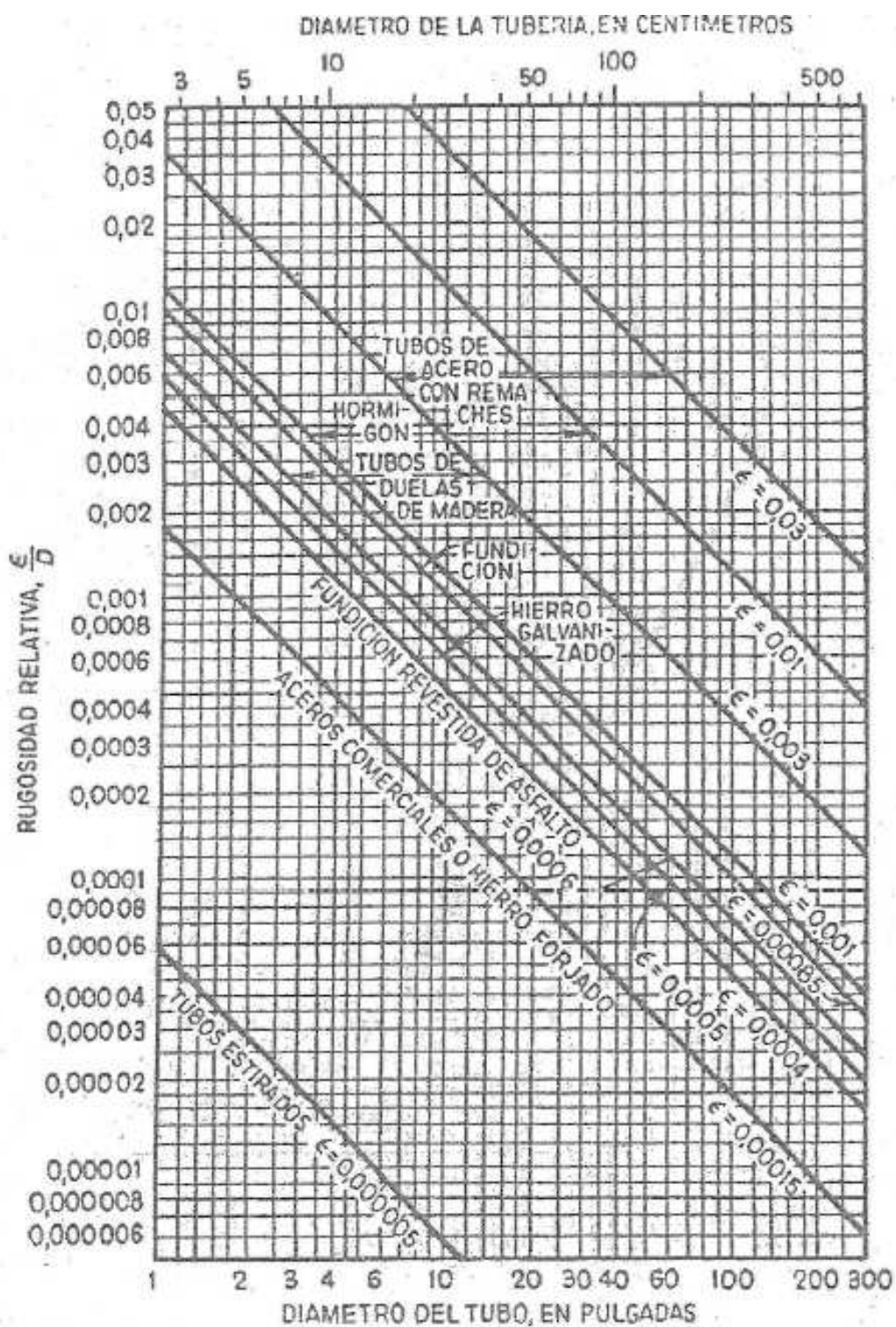
**Tabla A.13.24.**

Vida útil de equipos (Aries y Newton, 1998)

Aparato	Vida (años)	Aparato	Vida (años)
Calderas vapor	25	Digestores	10
Edificio hormigón	50	Espesadores	5
Edificio ladrillo y acero	33	Filtros prensa	17
Motores eléctricos	14	Hornos eléctricos	20
Transformadores	15	Hornos de gas	8
Bombas	20	Molinos	12
Columnas	8	Refrigerantes	17
Compresores	20	Secaderos	25
Condensadores y evaporadores	17	Tamizadoras	12
Depósitos	10	Tuberías	15



**Figura A.13.1.**  
Gráfico de Moody (Rase H.F., 1963)

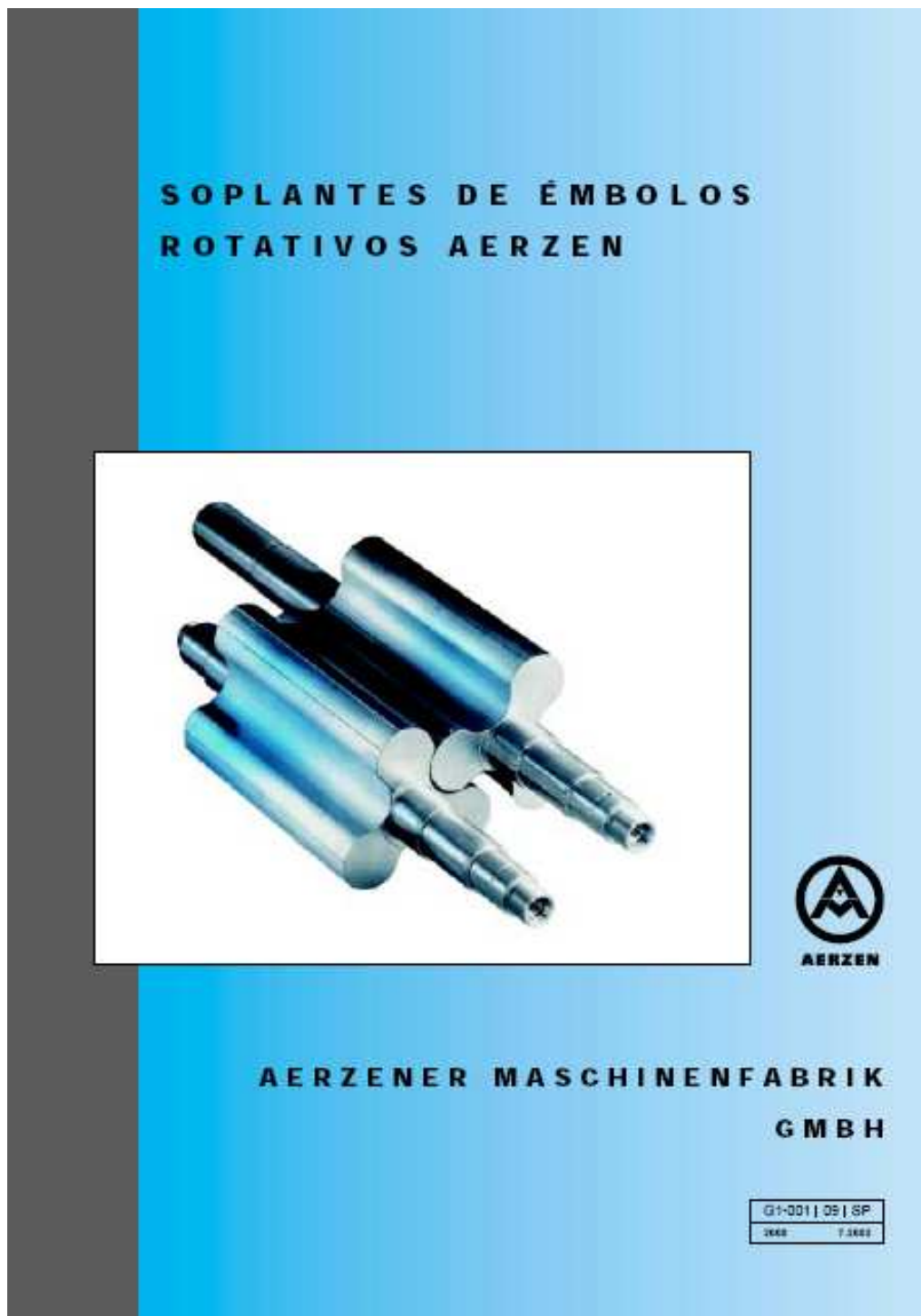


**Figura A.13.2.**

Rugosidad relativa de materiales (Rase H.F., 1963)



## Anexo 14: Catálogos



## Soplantes de émbolos rotativos AERZEN

### Para el transporte y compresión sin aceite de aire y gas

Los soplantes de émbolos rotativos (tipo "Roots") se fabrican desde 1.868 y hoy en día son máquinas de producción muy bien desarrolladas, diseñadas y adaptadas para que se puedan utilizar en una amplia variedad de aplicaciones.

Los siguientes ejemplos son sólo algunas de las muchas aplicaciones en las que se pueden utilizar los soplantes AERZEN:

- **Transporte neumático de materiales de gran volumen en presión o vacío.**  
El tamaño de las máquinas va desde los soplantes instalados para descarga neumática de buques de transporte mediante vacío. La capacidad por hora de este tipo de instalaciones de descarga es de 1.000 toneladas.
- **Aireación de balsas en plantas de agua residuales.**
- **Aireación de filtros de arena en potabilizadoras de agua.**
- **Roots de alto vacío equipados con sello especial en el eje.**
- **Transporte de casi todos los gases** que se encuentran en las industrias químicas, petroquímicas y metalúrgicas. Los diseños especiales se instalan para tratar los gases agresivos. Las máquinas que se utilizan en plantas de energía convencional y nuclear han de cumplir ciertas categorías de regulación de seguridad.
- **Soplantes de impulsión de gas** con presiones estáticas internas de hasta 25 bar.
- **Producción de acero.** Aplicación en plantas de reducción directa.

#### Transporte del fluido sin aceite

El hecho de que los soplantes de émbolos rotativos transporten el aire sin aceite es una ventaja decisiva para el transporte neumático, en plantas de filtración de agua y en las industrias alimenticias y químicas. Los pistones rotativos giran y no se rozan entre sí ni con la carcasa, ya que la cámara de transporte no necesita lubricación, lo que garantiza que el medio transportado permanezca sin contaminación por contacto con lubricantes y otras partículas.

#### Transporte basado en émbolos rotativos

El caudal de aspiración varía muy poco en relación a la presión de impulsión. El soplante se puede adaptar al caudal de aire necesario variando simplemente la velocidad.

#### Amplia gama de selección

El extenso número de modelos y tamaños disponibles facilita la selección de la máquina óptima para cualquier aplicación. Los caudales de las máquinas oscilan desde 30 m³/h hasta 84.000 m³/h aprox.

#### Tipos de accionamiento

Los soplantes se accionan por medio de motores eléctricos, motores de combustión interna, motores de aire comprimido o hidráulico por acoplamiento flexible (ejecución 4, DA), motor de bridas B 5 (para soplantes HV), accionamiento por correas trapezoidales (ejecución 5, FA), accionamientos que reducen la presión, transporte de engranaje cambiante o accionamiento de velocidad variable (ejecución 6, 6h).

#### Elevada eficiencia mecánica

Los émbolos rotativos giran sin hacer contacto, por lo que las pérdidas de energía mecánica sólo se generan en los engranajes de sincronismo y cojinetes. El uso de cojinetes de bola y rodillos así como engranajes de sincronismo templados y rectificadas reduce las pérdidas al mínimo. Además, es recomendable que el engranaje helicoidal ofrezca un sistema silencioso.

#### Elevada eficiencia volumétrica

Los émbolos rotativos y los componentes de la soplante se fabrican utilizando maquinaria de precisión de control numérico, que garantizan las tolerancias exactas incluso en la larga escala de producción de componentes estándar. Esto se ve reflejado en la estrecha tolerancia entre los rotores, así como entre los rotores y la carcasa, que da como resultado grados muy elevados de eficiencia volumétrica.

#### Fiabilidad y seguridad operativa

Los soplantes de émbolos rotativos AERZEN son fabricados por profesionales muy cualificados y experimentados y no son suministrados hasta que estén totalmente probados. Cada uno de los soplantes pasan una serie de pruebas que duran unas horas, bajo condiciones en las que va incrementando la carga. Se ha preparado un historial de prueba con todos los datos de servicio.



#### Principio de funcionamiento

Dos rotores asimétricos giran en direcciones opuestas. El medio que se transporta fluye por la parte externa de los rotores y se desliza de la boca de entrada a la boca de salida, por medio de las cámaras entre los rotores y la carcasa. En el momento en el que el extremo del rotor alcanza el borde del canal de pre-admisión, el volumen del gas desplazado está impulsado por la contrapresión por el gas presurizado, que se encuentra en la tubería de transporte. La presión final se ajusta automáticamente al nivel de presión en la corriente de la tubería y los componentes. Una vez se conozcan los datos del soplate específico se puede calcular el flujo necesario para transmitir toda clase de gases bajo varias condiciones operativas. Cada vuelta del rotor produce el desplazamiento y la compresión del llamado volumen del cangilón  $q_0$  (litro/vuelta). El volumen de cangilón muestra una constante para cada tamaño del soplate. Esto produce una capacidad teórica.

$$Q_0 = \frac{n \cdot q_0}{1000} \text{ (m}^3\text{/min)}$$

La capacidad actual se obtiene de la deducción de la cantidad de gas  $Q_p$  perdiendo los espacios de la capacidad teórica:

$$Q_1 = Q_0 - Q_p \text{ (m}^3\text{/min)}$$

La cantidad de pérdida a través mediante las tolerancias depende de la densidad del gas en la admisión, la presión diferencial  $\Delta p$  y el área total  $F$  de las incisiones. La eficiencia volumétrica es:

$$\eta_v = \frac{Q_1}{Q_0} = 1 - \frac{Q_p}{Q_0}$$

La eficiencia bajo las condiciones de funcionamiento

es muy favorable, ya que las tolerancias de los rotores se mantienen muy ajustadas. El volumen de rendimiento varía muy poco con los cambios en carga (véase pág. 4). La potencia necesaria para comprimir el gas en condiciones de entrada es, teóricamente:

$$P_s = \frac{Q_0 \cdot \Delta p}{600}$$

Esta potencia se debe incrementar para compensar la fricción mecánica en los cojinetes, engranajes de sincronismo, componentes herméticos, así como las pérdidas dinámicas que ocurran en las bocas de la soplate y la cámara de transporte. La potencia necesaria en el acoplamiento del soplate es:

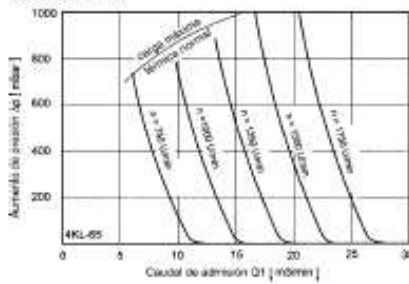
$$P_k = P_{in} + P_v \text{ (kW)}$$

El componente principal p.ej. la potencia teórica para la compresión, es independiente del tipo de gas implicado, y directamente proporcional al diferencial de presión y la velocidad del soplate. La potencia absorbida cuando funciona sin carga es casi igual a la pérdida de potencia  $P_v$ , ya que no interviene ninguna compresión interna.

Esto representa aproximadamente el 3 del 5% de la valoración de potencia de carga completa transmitida por medio del acoplamiento.

Debido a la suma de todas las tolerancias de fabricación, el consumo de potencia y el volumen de corriente de consumo puede mostrar una tolerancia de  $\pm 5\%$ .

Curvas del funcionamiento volumétrico de un sopiante de émbolos rotativos



#### Comportamiento acústico

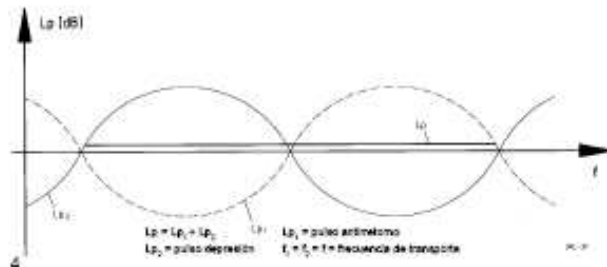
La reducción de ruido para los sopiantes de émbolos rotativos es necesaria debido a las necesidades cada vez más severas de medio ambiente. Si estas son máquinas de ruido puro es relativamente fácil colocar unos protectores acústicos. Pero en el caso de que la entrada del sonido se deba reducir, sólo existen dos posibilidades:

1. medidas secundarias
2. medidas primarias

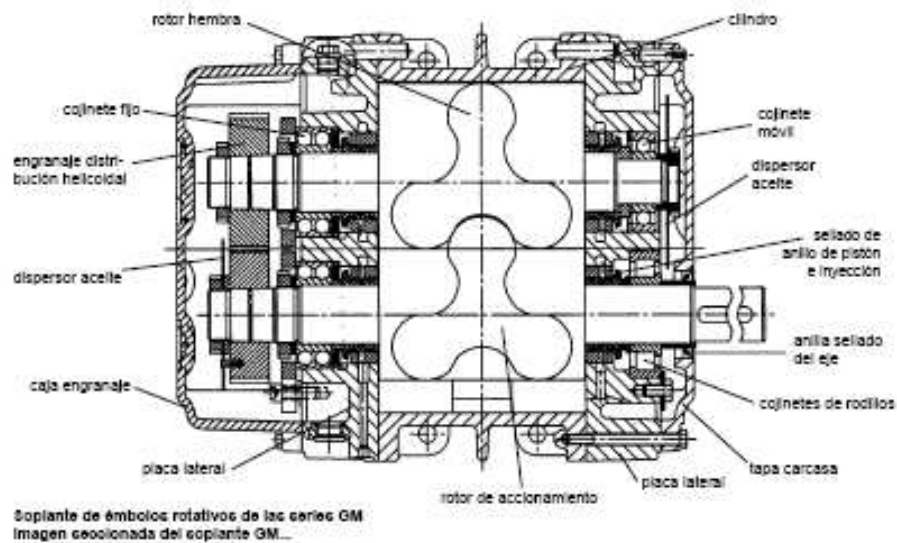
Los silenciadores, silenciadores de impulsión, aislamiento de sonido de la tubería, etc son costosas medidas secundarias. Aerzener Maschinenfabrik se ha decido por las medidas primarias p.ej. para reducir el ruido desde el origen. Por este motivo se han desarrollado los sopiantes trilobulares.

El fin se logró mediante el desarrollo de los sopiantes de émbolos rotativos con reducción de pulsación integrada. El sopiante-cilindro se equipó con el canal de pre-entrada cuyo tipo, tamaño y posición se ha determinado de forma experimental. Junto con los émbolos rotativos trilobulares se producirá una entrada más suave hacia la parte de impulsión y el pulso habitual de la corriente de retorno alcanza la cámara de transporte de forma un poco más débil (véase símbolo- sopiante pieza derecha de pág.).

Pero todavía existe una segunda fuente de ruido en los sopiantes. Es el llamado pulso de presión que aumenta cuando el pistón principal de uno de los émbolos desciende en la pendiente del otro. Debido a la posición y la forma de la pre-entrada de las cámaras, la posición de fase y la amplitud se pueden conectar con el fin de que se solapen la una a la otra. Naturalmente, esto en la práctica no se puede conseguir al 100%. Sin embargo, las pruebas han demostrado que se ha alcanzado una reducción de ruido de 20dB (A).







#### Diseño y construcción

Los sopiantes de émbolos rotativos son máquinas de ejes rotativos gemelos. Los dos rotors se han colocado de forma axial en paralelo el uno del otro y centrados en la carcasa. Los engranajes de sincronismo aseguran que los rotors giren sin hacer contacto. Los rotors se montan sobre cojinetes de bolas y rodillos. Con el fin de conseguir un rendimiento elevado se ha mantenido unas tolerancias entre los rotors muy ajustadas y basadas, en la presión diferencial y la carga térmica bajo condiciones de funcionamiento. En caso de los sopiantes de mayor tamaño, las tolerancias de los cojinetes y la desviación del eje tienen una influencia sobre el espacio.

Los espacios más grandes entre los rotors y el final de las placas laterales compensan la expansión térmica axial en el final de los cojinetes flotantes.

#### Rotores

Los rotors están equilibrados de forma dinámica. Los sopiantes más pequeños de los tamaños GM 3 S-GM 80 L están forjados en una sola pieza el rotor y los ejes (C 45 N). Los tamaños GM 90 S y más grandes se fabrican con pistones de GGG 40 y ejes de acero (C 45 N). Las cavidades de los rotors GGG 40 están tapadas, ya que es donde se acumulan las partículas de contaminación durante el funcionamiento.



#### Carcasa

Las carcasas están fabricadas con una elevada calidad de hierro fundido gris (GG 20). La carcasa del sopiante no necesita refrigeración adicional, incluso en cargas elevadas. En el caso del tamaño GM 80 L los pies del sopiante están unidos.

#### Engranajes de sincronismo

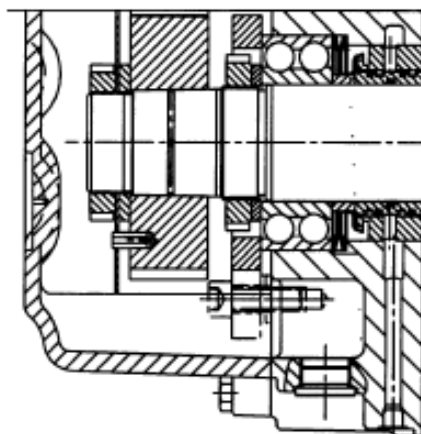
Los engranajes de sincronismo helicoidales están templados y rectificadas y se fijan con una gran precisión. La posición y la fijación de los engranajes a los émbolos se produce mediante presión hidráulica, que garantiza una fijación total.

#### Materiales especiales

Los materiales no estándar tales como el hierro fundido con grafito nodular (GGG 40), acero fundido (GS - C 25) y acero fundido CrNi están disponibles para aplicaciones especiales. Estos materiales sólo se suministran en ejecuciones especiales.

#### Configuración de hermetización, series GL y GM

Estos modelos se han diseñado para el transporte de aire o gases neutrales. La cámara de transporte se ha hermetizado de las cámaras de aceite mediante un dispensador de aceite junto con sellados laberínticos con anillos de pistón que tiene una cámara de ventilación central dimensionada (canal de condensación) y que juega un papel crucial para asegurar que el medio transportado permanezca limpio y sin aceite. El eje de accionamiento se hermetiza mediante un retén de sellado radial instalado en la tapa de la carcasa.



#### Diseños especiales:

Retenes de sellado radial con doble purga de aceite en el transporte del gas.

Retenes de sellado radial con doble purga de aceite, manguito del eje y carcasa de sellado con anillos de aire refrigerado (del canal de aire de refrigeración con perfil 18) que se utilizan en diseños de alto vacío. Un sellado mecánico de doble acción con un circuito de bloqueo de aceite para las aplicaciones incluyendo carcasas de presión fuerte pensadas para presiones internas estáticas de hasta 25 bar.

#### Configuración de hermetización,

##### Sopiantes de gas de las series GRa, GRb y GR

Estos modelos representan las carcasas de cojinetes que están fuera de la cámara de transporte. Los conductos de los ejes en la cámara de transporte están hermetizados de la atmósfera mediante los cierres mecánicos de doble efecto, que son o bien de inyección de agua o de aceite refrigerado o por sellado laberíntico.

#### Configuración de hermetización,

##### Sopiantes de gas de la serie GQ

Los cuatro conductos de los ejes que se encuentran en la cámara de transporte están hermetizados mediante sellado mecánico especial.

#### Lubricación

Los sopiantes de émbolos rotativos se lubrican por barboteo. Los discos dispensadores de aceite y los engranajes de sincronismo conducen el lubricante hacia los cojinetes de bolas y rodillos. En casos especiales en los que el lubricante por barboteo es inadecuado, como resultado de elevada velocidad o temperatura de funcionamiento que requieren refrigeración de aceite, o en los que se requiere un sistema de recirculación de aceite junto con la hermetización mecánica de refrigeración de aceite, se suministra un sistema de lubricación de aceite forzado y centralizado (para los grados de aceite consultar las instrucciones del funcionamiento).

Dibujo:  
Sellado de aceite para la cámara de transporte, cojinetes de regulación, engranaje de distribución helicoidal

## Soplantes Aerzen de proceso de gas I

Tipo GR/Bra/GRb

12 tamaños

caudales de aspiración 100 hasta 50.000 m³/h

### Campos de aplicación

Transporte de gases industriales que también pueden ser agresivos.

Presión y vacío.

Diferencial de presión hasta 800 mbar.

Diferencial de vacío hasta 450 mbar.

### Diseño

La cámara de transporte se encuentra completamente separada de los cárter de aceite mediante un espacio abierto a la atmósfera.

### Hermetización de los ejes

Cámara de transporte sellado mediante:

- a) embalaje suave con conexiones para purga de gas.
- b) sellado laberíntico con anillos de carbón y conexiones de gas.
- c) cierres mecánicos de doble acción con aceite.
- d) cierres mecánicos de doble acción con agua.

Eje de accionamiento mediante anillos de sellado.

### Dirección del flujo

Vertical, de arriba abajo.

### Accionamiento

Directo mediante acoplamiento flexible.

Transmisión por correas trapezoidales (hasta 250 kW potencia instalada).

### Materiales especiales

Los modelos también están disponibles en CrNi, pieza de acero o con capas diferentes, dependiendo de las condiciones de funcionamiento.

Para consultar más detalles remitir al catálogo G1-151.



GRa 12.4 y 13.8  
GRb 14.8 hasta 16.12

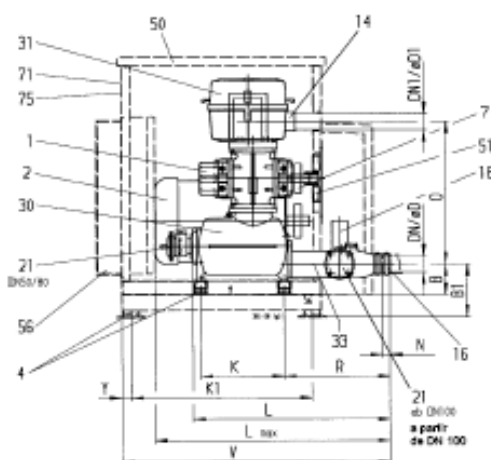


GR 17.14 hasta 21.22

## Información relacionada con los agregados de soplantes de émbolos rotativos

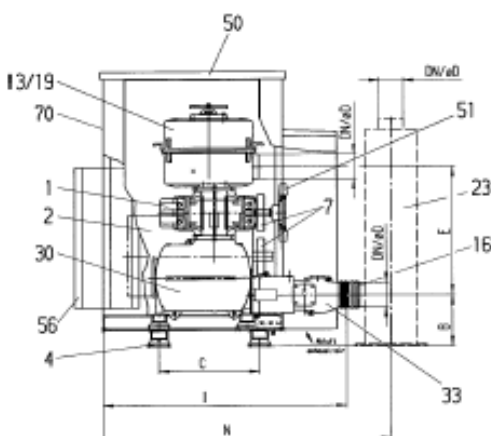
Diseños del agregado:

1.) SOPLANTE DELTA, sobrepresión, aspiración externa



- 1 soplante de émbolo rotativo
- 2 motor eléctrico
- 4 pie de máquina flexible
- 7 accionamiento por correa
- 8 protección de la correa  
(sólo en caso de instalación sin  
silenciador acústico)
- 14 conexión SS con tubería flexible
- 16 manguito DS flexible
- 18 válvula de presión
- 21 mecanismo de puesta en marcha de  
descarga (accesorios)
- 28 soporte de motor con basculante
- 30 soporte base
- 31 silenciador del filtro
- 33 carcasa DS de conexión con  
válvula antirretorno integrada
- 45 tubo flexible (accesorios)
- 51 ventilador
- 56 protección (accesorios)
- 71 manómetro de presión (accesorios)
- 75 indicador de colmatación de filtro  
(accesorios)

2.) SOPLANTE DELTA, vacío, aspiración de tubería



- 1 soplante de émbolo rotativo
- 2 motor eléctrico
- 4 pie de máquina flexible
- 7 accionamiento por correa
- 8 protección de la correa  
(sólo en caso de instalación sin  
silenciador acústico)
- 13 silenciador de aspiración
- 16 manguito DS flexible
- 19 válvula de seguridad
- 23 silenciador de soplado (accesorios)
- 28 soporte de motor con basculante
- 30 soporte base
- 33 carcasa DS de conexión con  
válvula antirretorno integrada
- 50 silenciador acústico
- 51 ventilador
- 56 protección (accesorios)
- 70 vacuómetro (accesorios)

#### Accesorios

Nuestros agregados de soplantes incluyen los accesorios estándar para el funcionamiento continuo. La instalación se efectúa de forma elástica sobre superficies lisas y resistentes, plantas elevadas o estructuras de acero. También es posible una instalación rígida en bases concretas. En la mayoría de los casos los soplantes se accionan por un motor asíncrono de tres fases y un accionamiento por correas, por ajuste del caudal de volumen. También están disponibles, a petición del cliente, diseños especiales como un accionamiento directo o materiales especiales.

#### Instalación

En el caso de que el soplante se instale en lugares en los que pueda haber mucho ruido o vibraciones, debe seleccionarse la versión estándar Aerzen "Instalación sobre pie de maquinaria flexible". También es necesario conectar el agregado del soplante con la tubería de la planta.

#### Regulación del caudal

Debido al transporte forzado no puede efectuarse una regulación de soplantes de émbolos rotativos mediante un estrangulamiento de los caudales de aspiración. Por otro lado, el volumen de transporte es independiente de la contrapresión que ha superado el soplante. Por este motivo sólo se puede conseguir un volumen de caudal de energía eficiente mediante una regulación bypass o una regulación de descarga. El volumen que vuelve a circular en la operación bypass se debe refrigerar, sino el soplante se verá afectado por la sobrecarga térmica.

#### Silenciador

Con el fin de reducir el ruido de aspiración y descarga del aire transportado de los soplantes, se utilizan los silenciadores en el lado de aspiración y de impulsión. El tipo de silenciador usado depende del nivel de silencio que se necesite.

En caso de que se produzca mucho ruido se pueden emplear silenciadores adicionales para la supresión de la presión de la tubería.

La radiación del ruido procedente de la carcasa se reduce mediante protecciones acústicas.

Las protecciones acústicas Aerzen se pueden suministrar junto al soplante compacto o pueden añadirse más tarde. Es bueno instalar los soplantes más grandes o las máquinas múltiples en habitaciones separadas aisladas del ruido.

#### Medidas de seguridad

Los soplantes de émbolos rotativos Aerzen están protegidos de la sobrecarga mediante válvulas dimensionadas de alivio de presión y/o de vacío.

En el lugar donde están encerradas las tuberías de descarga o admisión en la ausencia de tales mecanismos de protección, se forma el vacío o la presión excesiva debido a los émbolos rotativos, que puede producir una posible avería del soplante. Sin embargo, estas válvulas no sustituyen la protección del lado de la planta. Cuando se transporten los gases es muy importante asegurarse de que los gases calientes no vuelvan a circular hacia la entrada del soplante: primero debe refrigerarse el gas que vuelve a circular. Sólo se puede administrar un refrigerante en aquellos casos, cuyos soplantes funcionen bajo cargas de presión extremadamente bajas o durante la puesta en marcha. Las válvulas de retención (alcance de suministro Aerzen) deben instalarse detrás de la tubería de presión y la válvula de presión, se suprime mediante la desconexión del funcionamiento inverso del soplante bajo plena carga. Es imprescindible instalar válvulas de retención en los soplantes que actúan en paralelo.

#### Puesta en marcha

Por norma general, los soplantes de émbolos rotativos Aerzen se pueden accionar contra la presión completa del sistema en caso de puesta en marcha directa de los motores. En casos en los que los motores de accionamiento se pongan en marcha por estrella-triángulo o usen motores de combustión interna se debe tener cuidado al accionar el soplante bajo condiciones sin carga, teniendo en cuenta las características del par de torsión de arranque de estas máquinas.

## En todas partes una buena dirección

### República Federal de Alemania

Techn. Verkaufsbüro Nord  
Weißer Kamp 23  
20693 Fallingb. / Germany  
Tel. ++ 49 51 82 95 13-0  
Fax ++ 49 51 82 95 13 20

Techn. Verkaufsbüro Ost  
Schillerstraße 49  
10627 Berlin / Germany  
Tel. ++ 49 30 3 13 02 10  
Fax ++ 49 30 3 12 10 81  
Sub-office:  
Residenz im Park Nr. 12  
04824 Baucha / Germany  
Tel. ++ 49 3 42 92 7 52 35  
Fax ++ 49 3 42 92 7 49 38

Techn. Verkaufsbüro Mitte  
Erfurter Straße 2  
63796 Kahl / Germany  
Tel. ++ 49 61 86 91 04-0  
Fax ++ 49 61 86 91 04 20

Techn. Verkaufsbüro Süd  
Föhrenweg 1  
69275 Elchingen / Germany  
Tel. ++ 49 73 06 26 00-0  
Fax ++ 49 73 06 26 00 20

Techn. Verkaufsbüro West  
Taubenstr. 12  
42699 Velbert / Germany  
Tel. ++ 49 20 51 35 54-0  
Fax ++ 49 20 51 35 54 18

Otto Zimmermann GmbH  
Unterföhrer Straße 9  
66117 Saarbrücken / Germany  
Tel. ++ 49 6 61 5 02 07-0  
Fax ++ 49 6 61 5 02 07 43

### Europa

Aerzen Belgium NV  
Zone Gueldendale  
A. De Coninckstraat 11  
3070 Kortenberg / Belgium  
Tel. ++ 32 2-7 57 22 78  
Fax ++ 32 2-7 57 22 63  
para Bélgica y Luxemburgo

Aerzen-France S.A.R.L.  
10, Avenue Léon Hamel  
92168 Antony Cedex  
France  
Tel. ++ 33 1-46 74 13 00  
Fax ++ 33 1-46 66 00 61

Aerzen Machines Ltd.  
Aerzen House, Langdon Road  
Loughdon, Essex, IG10 3BQ  
United Kingdom  
Tel. ++ 44 20 8502 8100  
Fax ++ 44 20 8502 8102

Aerzen Nederland B.V.  
Bedrijfsverhuur  
Nieuwgraaf 124  
6921 RL Quiven  
The Netherlands  
Tel. ++ 31 25-311-28 41  
Fax ++ 31 25-311-75 69

Aerzen (Schweiz) AG  
Zürcherstrasse 300  
8500 Frauenfeld  
Switzerland  
Tel. ++ 41 82-7 25 00 65  
Fax ++ 41 82-7 25 00 68  
para Suiza y Liechtenstein

Aerzen Iberica S.A.  
c/Urogallo 13  
28946 Fuenlabrada  
Spain  
Tel. ++ 34 91-6 42 30 00  
Fax ++ 34 91-6 42 29 03

Aerzen Iberica S.A.  
Pr. 5 de Outubro, 52, 2ºD  
2775-184 Parede / Portugal  
Tel. ++ 3 51 2 14 57 34 77  
Fax ++ 3 51 2 14 57 34 79

Aerzen Austria  
Handelsges. m.b.H.  
Oberdorfstr. 5  
2201 Seyring / Austria  
Tel. ++ 43 2 24 52 84 44  
Fax ++ 43 2 24 52 84 46

Aerzen Svenska AB  
Östra Bangatan 20  
15860 Märsta / Sweden  
Tel. ++ 46 8-50 12 21 90  
Fax ++ 46 8-50 11 72 09

Aerzen Polska S.A.  
Ul. Marszałek 9/17  
02-654 Warszawa / Poland  
Tel. ++ 48 22 642 29 00  
Fax ++ 48 22 642 33 05

Aerzen Slovakia S.R.O.  
Národná 17  
90031 Slupova / Slovakia  
Tel. ++ 4 21 2 65 50 48 94  
Fax ++ 4 21 2 65 45 71 01

Aerzen Hungaria KFT  
Rák György utca 56  
1122 Budapest / Hungary  
Tel. ++ 36 12 02 54 55  
Fax ++ 36 12 02 54 66

Aerzen Cz s.r.o.  
Náměstí TGM 28  
69502 Brno  
Czech Republic  
Tel. ++ 42 05 27 32 68 57  
Fax ++ 42 05 27 32 68 58

Oy Ilmecco AB  
Mäntylä 21  
00270 Helsinki / Finland  
Tel. ++ 3 56 9-4 77 21 22  
Fax ++ 3 56 9-4 77 22 25

Bran & Loebe AS  
Sandviken 22  
1363 Hævik / Norway  
Tel. ++ 47 87 83 26 50  
Fax ++ 47 87 83 26 51  
para Noruega e Islandia

Gesellschaft Technik AS  
Roslundevej 5-10  
2620 Albertslund  
Denmark  
Tel. ++ 45 43-68 50 00  
Fax ++ 45 43-68 50 50

MANGRINOX S.A.  
14, Grevenson St.  
11855 Athens / Greece  
Tel. ++ 30 1-3 42 32 01-3  
Fax ++ 30 1-3 45 97 57

Afonso Savio Figs s.a.s.  
di Savio Alberto & C.  
Via Vitor Pisani, 25  
20124 Milano / Italy  
Tel. ++ 39 02-87 07 52 77  
Fax ++ 39 02-87 07 50 03

Centat Mórészék  
ve De Tócsart Ltd. 58  
Aranybasi Sokak Nr. 10/12  
81350-Kadiköy-Istanbul  
Turkey  
Tel. ++ 90 2 16-3 45 02 83  
Fax ++ 90 2 16-3 38 94 65

HAFI  
Engineering & Consulting  
Gesellschaft m.b.H.  
Mühlhofplatz 4-6  
8600 Feldkirch / Austria  
Tel. ++ 43 55 22-7 75 240  
Fax ++ 43 55 22-7 40 38  
para el resto de países de Europa del Este

### Brasil, EE.UU. y Canadá

Aerzen do Brasil Ltda.  
Rua Howard Archibald Achenes  
Jr. N° 515  
Jardim da Glória, Cep 06711  
200 Cotia, SP / Brasil  
Tel. ++ 55 11-48 12 40 21

Fax ++ 55 11-48 12 02 32  
Aerzen USA Corporation  
645 Sands Court  
Cottleville, PA 19320/USA  
Tel. ++ 1 610-3 90 02 44  
Fax ++ 1 610-3 90 02 78

Aerzen Canada Blowers  
Compression Inc.  
1995 Montée Labossière  
Vaudreuil, Québec J7V8P2  
Canada  
Tel. ++ 1 450-4 24-39 66  
Fax ++ 1 450-4 24-39 66

La dirección de nuestros  
representantes en otros  
continentes les será facilitada  
sobre consulta



### Aerzen Ibérica S.A.

c/Urogallo 13, Pol. Ind. Los Gallegos · 28946 Fuenlabrada (Madrid) / España  
Tel. + 34 91-6 42 30 00 · Fax + 34 91-6 42 29 03 · E-mail: aerzeniberica@aerzen.es  
Delegación Este: c/Sepúlveda, 117-119, 2º, 2ª · 08015 Barcelona / España  
Tel. + 34 93-3 23 07 53 · Fax + 34 93-4 53 96 56 · E-mail: aerzeneste@aerzen.es





---

## INSTALLATION, OPERATION and MAINTENANCE MANUAL

### CENTRY® SERIES

#### SEALED CENTRIFUGAL PUMPS



**Model 620 - Sealed**

#### Table of Contents

	Forward .....	2
Section 1:	General Information .....	3-7
Section 2:	Safety Precautions .....	8
Section 3:	Pump & Motor Installation .....	9-13
Section 4:	Start-Up & Operation .....	14-15
Section 5:	Maintenance & Repair .....	16-23
	Appendix .....	24-39

© Dec. 2006 Liquiflo. All rights reserved

Document No.: 3.20.023

443 North Avenue, Garwood, NJ 07027 USA

Tel: 908-518-0777

Fax: 908-518-1847

www.liquiflo.com



## Section 1: General Information

This manual covers the Centry® Series Sealed Centrifugal Pump, Model 620. (Note: Model 620 was formerly called Model 62.)

### 1.1 Pump Description

Model 620 is an end-suction sealed centrifugal pump with the following features:

- Available with packing or single internal/double mechanical seals
- Close-coupled or long-coupled mounting options
- Choice of threaded or flanged ports
- Back pullout design to simplify maintenance
- Driver-supported shaft that simplifies pump design
- Standard reduced impeller sizes to simplify pump selection

The pump *Model Number* and *Serial Number* are stamped on the *Stainless Steel Tag* that is attached to the pump's housing. The *Serial Number* is also permanently stamped on the pump's volute.

The *Model Number* completely describes the pump's construction and is required when ordering either a new pump or replacement parts for an existing pump. The *Model Number* for the sealed pump is based on a 7-position *Model Coding* system that is described in [Section 1.4](#) (see [Page 5](#)).

### 1.2 General Instructions

The materials of construction of the pump are selected based upon the chemical compatibility of the fluid being pumped. The user must verify that the materials are suitable for the surrounding atmosphere.

If the fluid is non-conductive, methods are available to mechanically ground the isolated shaft. This is only necessary if the surrounding atmosphere is extremely explosive or stray static charges are present.

Upon receipt of your Liquiflo pump:

- 1) Inspect pump and verify that it was not damaged during transit.
- 2) Inspect tag and verify that the *Model Number* of the pump matches the *Model Number* of the pump that was ordered.
- 3) Record the following information for future reference:

Model Number:
Serial Number:
Date Received:
Pump Location:
Pump Service:



### 1.3 Pump Specifications

Table 1: Dimensional Specifications

Parameter	Specification	Unit
Suction Port Size	1.00	in
Discharge Port Size	0.75	in
Impeller Diameter	3.75	in
Standard Impeller Trims	3.50, 3.25, 3.00, 2.75	in
Impeller Type	Open	—
Port Type	Threaded (NPT) or Flanged (ANSI 150# RF)	—
Mounting Bracket	Close-Coupled, Motor Supported <sup>1</sup>	—
Motor Frame (C-Face)	NEMA 56C thru 145TC <sup>1</sup>	—

<sup>1</sup> - Power Frame option is available for long-coupling pump mounting bracket to other motor frames.

Table 2: Performance Specifications

Parameter	Specification	Unit
Maximum Speed	3600	RPM
Maximum Flow Rate	45	GPM
Maximum Differential Head	65	ft

Table 3: Absolute Temperature &amp; Pressure Ratings

Parameter	Specification	Unit
Minimum Operating Temperature	-40	°F
Maximum Operating Temperature	500	°F
Maximum Operating Pressure	300 <sup>2</sup>	PSI

<sup>2</sup> - For flanged pumps, max rating is 285 PSIG @ -20 to 100°F; above 100°F, derate by 0.29 PSIG/°F.

Table 4: Weight Data

Item	Single Seal	Packing & Double Seal	Unit
Pump w/Threaded Ports & Bracket	16	26	lbs
Pump w/Flanged Ports & Bracket	20	30	lbs
Power Frame	16	16	lbs

Table 5: Material Data

Component(s)	Material(s)
Pump Body & Impeller	316 Stainless Steel or Alloy-C
Shaft	316 SS/303 SS or Alloy-C/303 SS
O-rings/Gaskets	Teflon, Viton or Graphoil
Seal	Single or Double Mechanical Seal: Seal Face: Single: Carbon or Teflon; Double: Carbon Seal Seat: Ceramic or Silicon Carbide Seal Wedge: Teflon or Graphoil Seal Body: Single: 316 SS or Alloy-C <sup>3</sup> ; Double: 316 SS
	Packing Seal: Packing Ring: Braided Teflon or Graphoil Lantern Ring: Teflon
Mounting Bracket	Epoxy-painted Cast Iron
Mounting Hardware	18-8 Stainless Steel
Power Frame	Frame: Cast Iron/Epoxy; Shaft: Carbon Steel

<sup>3</sup> - Material will match Pump Body Material.

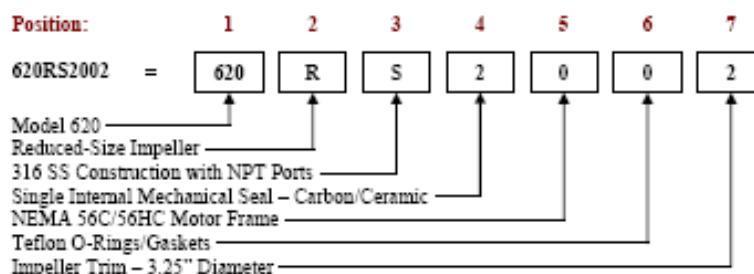
## 1.4 Model Coding

Table 6: Model Coding for Centry® Model 620 - Sealed

Position	Description	Code	Selection
1	Pump Model	620	Model 620
2	Impeller Size	F	Full-Size – 3.75" Diameter (Position 7 = 0)
		R	Reduced-Size (Position 7 = 1, 2, 3 or 4)
3	Basic Material of Construction & Port Type	S	316 SS Construction / NPT Ports
		H	Alloy-C Construction / NPT Ports
		L	316 SS Construction / Flanged Ports
		C	Alloy-C Construction / Flanged Ports
4	Seal Configuration	2	Single Internal Mechanical – Carbon/Ceramic
		3	Single Internal Mechanical – Teflon/Ceramic
		4	Double Mechanical – Carbon/Ceramic
		5	Lantern Ring – Teflon Packing
		7	Lantern Ring – Graphoil Packing
5	Motor Frame (or Power Frame)	0	Close-Coupled – NEMA 56C/56HC *
		1	Close-Coupled – NEMA 143TC/145TC *
		P	Pedestal Mount – Power Frame
6	O-rings/Gaskets (Housing)	0	Teflon
		V	Viton
		G	Graphoil
7	Impeller Trim (Standard)	0	No Trim (Position 2 = F)
		1	3.50" Diameter (Position 2 = R)
		2	3.25" Diameter (Position 2 = R)
		3	3.00" Diameter (Position 2 = R)
		4	2.75" Diameter (Position 2 = R)

\* Motor with base is required.

## Model Coding Example:



## 1.5 Pump Installation

During installation of the pump and supporting equipment, follow the guidelines given in Section 3. Pay special attention to all cautionary notes in this section.

## 1.6 Start-Up

Before operating pump, inspect the system as outlined in Section 4.1. If the pump has a packing seal or double mechanical seal, the seal must be supported as explained in Section 4.2. Do not start the pump until the inspection of the system is satisfactory and all safety precautions have been taken.

## 1.7 Operation & Troubleshooting

The successful and safe operation of a pump is not only dependent on the pump but also on each of the system components. It is therefore important to monitor the entire pumping system during operation and to perform the necessary maintenance to keep the system running smoothly.

Centrifugal pumps, when operating normally, will deliver a steady and pulse-less flow, be relatively quiet and have a predictable differential head and power requirement based on the operating speed, flow rate, fluid specific gravity and viscosity, and impeller size. Performance curves for centrifugal pumps are normally based on pumping water at room temperature. A performance correction is required when pumping liquids with significantly higher specific gravity and/or viscosity (see the Liquiflo Product Catalog or website: [www.liquiflo.com](http://www.liquiflo.com)).

Sealed centrifugal pumps operating normally will have virtually no leakage, except those with packing, which may require some leakage to properly lubricate the seal (see Section 4.2.1). Sealed pumps must not be run dry for more than a few seconds or damage to the seal will result.

If a significant problem is observed during operation, the pump should be stopped so that corrective action can be taken. The observed problem could have several possible causes, and multiple remedies for each cause. For help with problem solving, refer to the Troubleshooting Guide given in Appendix 5.

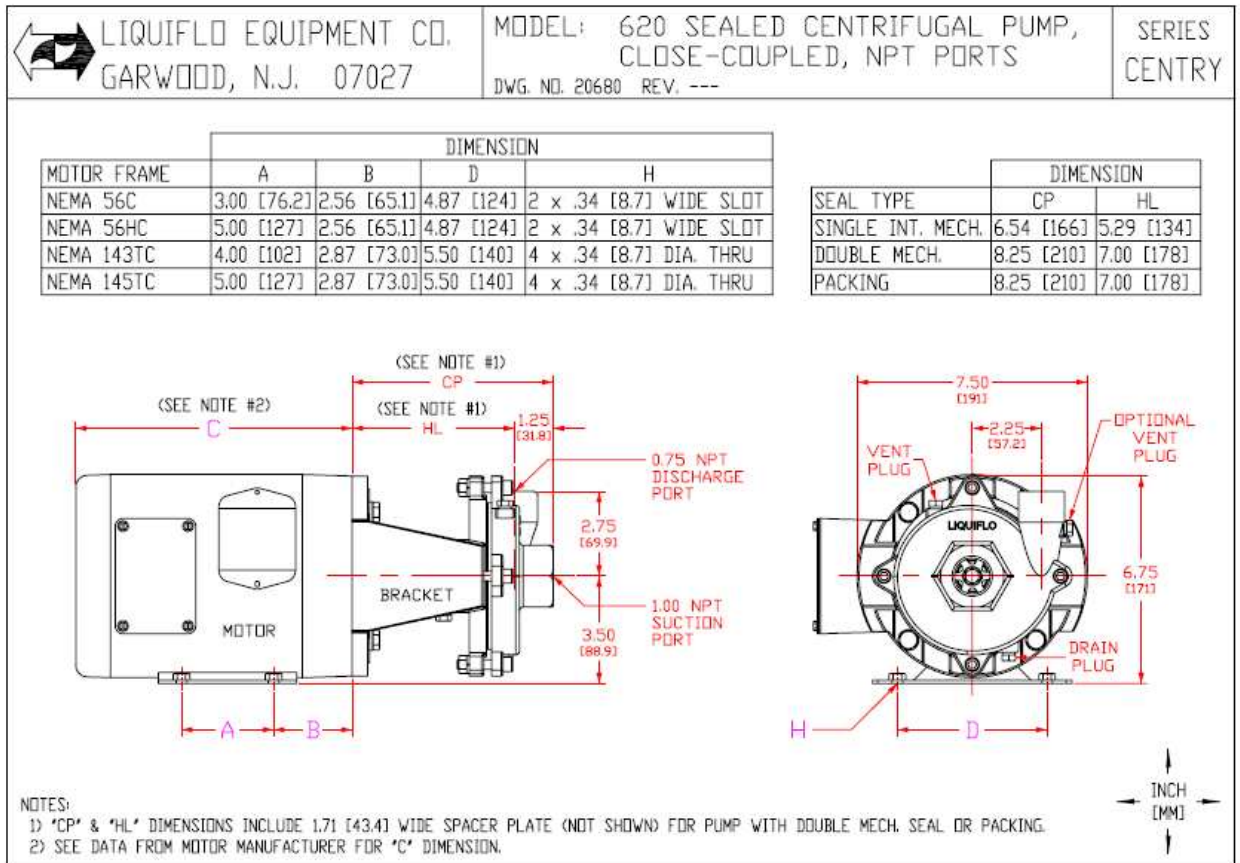
## 1.8 Maintenance & Repair

Pumps with a packing seal require periodic lubrication or tightening of the gland screws over time. Pumps with a double mechanical seal require maintenance of the fluid in the lubrication loop. Repair is necessary when the gland screws cannot stop the packing from leaking excessively, or when the mechanical seal starts to leak or when a decrease in head is observed.

Before performing maintenance, review the safety precautions given in Section 2. Removal of the pump from the piping system is covered in Section 5.2. To disassemble the pump, follow the procedure in Section 5.3. To replace the seal and rebuild the pump, follow the assembly procedure in Section 5.4. When performing maintenance, pay special attention to all cautionary notes given in these sections.

## 1.9 Replacement Parts

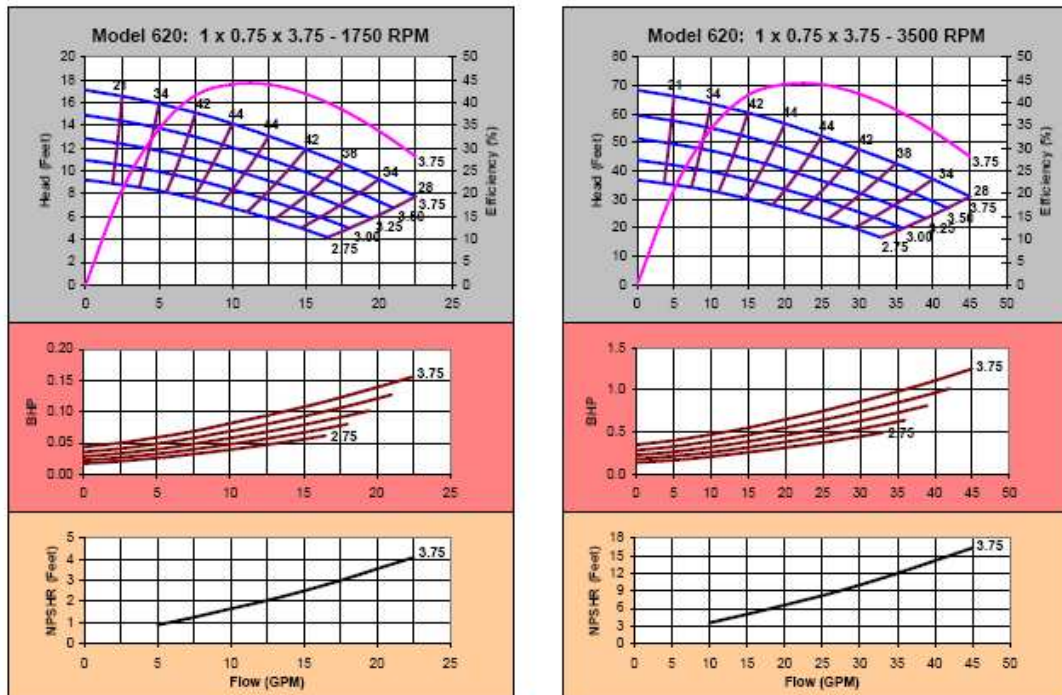
Replacement parts for the pumps can be purchased from your local Liquiflo distributor. Refer to Appendices 3 and 4 for individual parts information.

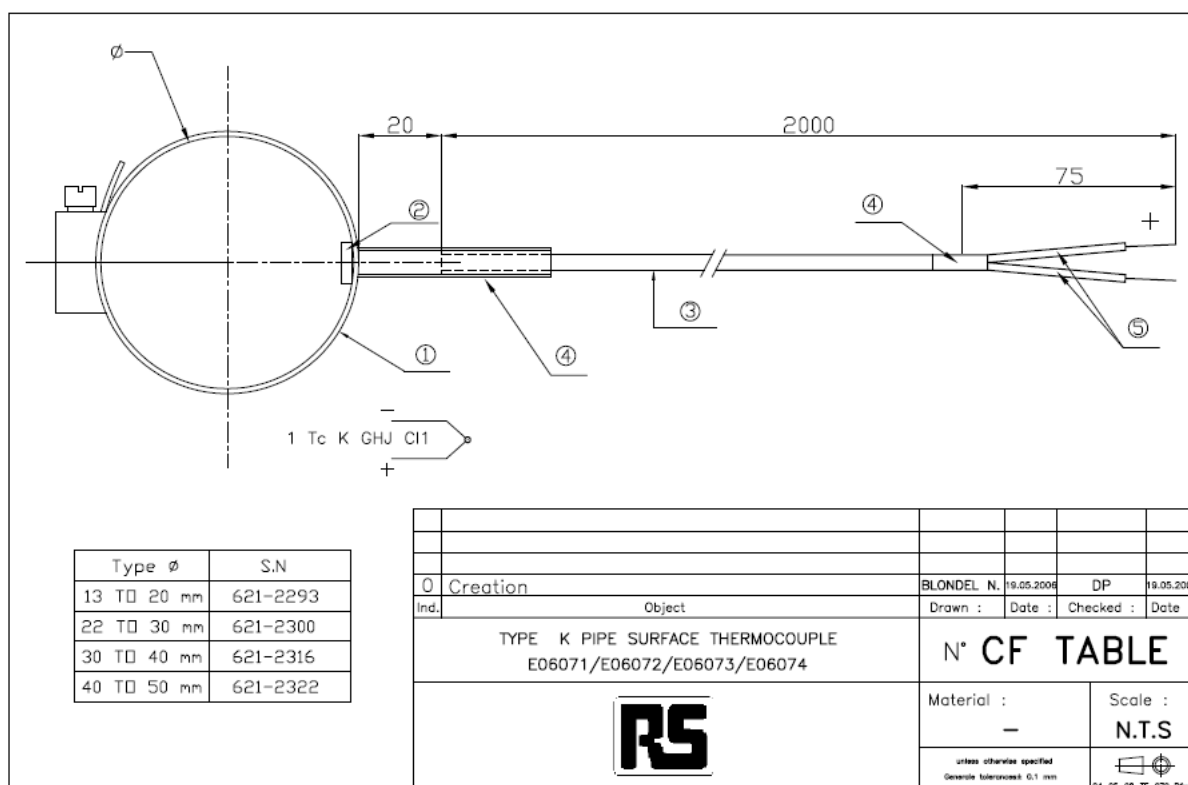


Liquiflo Centrifugal Pumps

Centry-Series Performance Curves



### Model 620








Type Ø	S.N
13 TO 20 mm	621-2293
22 TO 30 mm	621-2300
30 TO 40 mm	621-2316
40 TO 50 mm	621-2322


5	Heat shrink	PE
4	Sleeve	PE
3	Cable	FG/S.S Braid
2	Nozzle	AISI 304
1	Bracket Clip	Carbonsteel
Tag	Description	Material
0	Creation	BLONDEL N. 18.07.2008 DP 18.07.2008
Ind.	Object	Drawn : Date : Checked : Date :
TYPE K PIPE SURFACE THERMOCOUPLE E06071/E06072/E06073/E06074		N° CF Table
		Material : —
		Scale : N.T.S
		<small>autres références spécifiées</small> <small>Dessiné : BLONDEL N. D.T. 100</small> 

<b>Description</b>		Type K pipe surface thermocouple	
		13 to 20	621-2293
		22 to 30	621-2300
		30 to 40	621-2316
		40 to 50	621-2322
<b>Thermocouple type</b>		K	
<b>Grounded or Ungrounded</b>		Grounded	
According to IEC-BS 4937 60584-2 & IEC-BS 4937 60584-3			
<b>RoHS compliance</b>		Yes	
<b>Accuracy Class 2</b>		$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ or $\pm 0.0075\text{xT}$	
<b>Colour Codes IEC 60584</b>			
		+VE arm	green
		-VE arm	white
		overall	green
<b>Temperature</b>			
Range		-50 to +1100° C	
Operating		-50 to 400 °C	
<b>Cable characteristics</b>		7x0.2	
Section		0.22 mm <sup>2</sup>	
Conductor Insulation		Glass fiber	
Braid		Stainless Steel	
Length		2000 mm	
<b>Bracket clip</b>		13 to 30 mm pipe 22 to 30 mm pipe 30 to 40 mm pipe 40 to 50 mm Pipe	
<b>Application</b>		pipe surface temperature	
0	Creation	BLONDEL N	03.05.06 DP 03.05.06
Ind.	Object	Drawn :	Date : Checked : Date :
TYPE K PIPE SURFACE THERMOCOUPLE E06071/E06072/E06073/E06074		N° Cf TABLE	
		Material :	Scale :
		Unless otherwise specified, materials tolerances to 0.1mm	N.T.S 




ZRS  
Zurich Research Systems  
Sensoren & Messtechnik  
AG

Sensores Ópticos de Nivel



KOBOLD

Medir  
+  
Monitorizar  
+  
Analizar



- Repetibilidad:  
 $\pm 1 \text{ mm}$
- Presión: máx. 10 bar
- Temperatura:  
máx. 85°C
- Conexión:  
G 1/2, M 14
- Material (sensor):  
polisulfona  
material (cuerpo):  
polipropileno o  
acero inoxidable



Las oficinas KOBOLD existen en los siguientes países:

ARGENTINA, AUSTRIA, BELGICA, CANADA, CHINA,  
FRANCIA, ALEMANIA, INGLATERRA, PAISES BAJOS,  
POLONIA, ITALIA, SUIZA, USA, VENEZUELA

KOBOLD Messring GmbH  
Postfach 22-24  
D-48710 Metelen/Rh.  
☎ +49 (0)5942 209-0  
☎ +49 (0)5942 209-1  
✉ info@kobold.com  
Internet: www.kobold.com

Modelo:  
OPT.

4T



# Sensores Ópticos de Nivel Modelo OPT



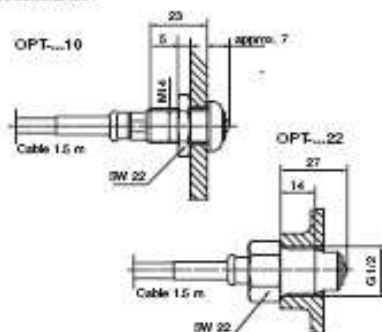
## Descripción

Los sensores de nivel óptico OPT se han diseñado para monitorizar líquidos transparentes. Debido a las dimensiones muy pequeñas, tiempos de conmutación muy breves y alta repetibilidad, los instrumentos también se adaptan para el servicio en recipientes pequeños. El sensor óptico se sitúa en una cubierta robusta. Alberga un hemisferio hueco plástico, en el cual el diodo infrarrojo es acondicionado como un transmisor y un semiconductor como receptor. Cuando el sensor no es mojado por el líquido la luz infrarroja se refleja completamente desde la superficie del hemisferio al receptor. Tan pronto como el sensor se cubre con el líquido, el índice de refracción en los cambios de capa limita cambia y la mayoría de los escapes ligeros en el líquido. Entonces, menos luz alcanza al receptor, que ocurre la conmutación. La sonda de nivel no se debe equipar con el sensor señalando hacia abajo, pues los errores pueden ocurrir debido a las gotas de líquido que se pegan a él.

## Aplicaciones

- Industria del automóvil
- Tecnología médica
- Protección de fugas
- Máquinas expendedoras de bebidas

## Dimensiones



## Datos de pedido (Ejemplo: OPT-3110)

Conexión* rosca a hembra	Alimentación	Número de pedido	
		Polipropileno	Acero Inoxida.
M 14 con tuerca	15.2 - 26.6 V <sub>DC</sub>	OPT-3110	OPT-3210
G 1/2	15.2 - 26.6 V <sub>DC</sub>	OPT-3122	OPT-3222

## versiones OEM : pin calificación CE

M 14 con tuerca	24 V <sub>DC</sub>	OPT-1110	OPT-1210
G 1/2	24 V <sub>DC</sub>	OPT-1122	OPT-1222
M 14 con tuerca	5 - 16 V <sub>DC</sub>	OPT-2110	OPT-2210
G 1/2	5 - 16 V <sub>DC</sub>	OPT-2122	OPT-2222
Relé para OPT-1..	220 V <sub>AC</sub>	REL-N220	

40

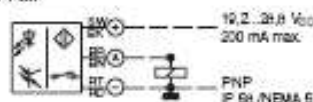
www.kobis.com

## Detalles Técnicos

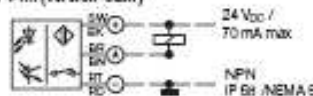
Cuerpo:	OPT-31..., OPT-11..., OPT-21...: Polipropileno OPT-32..., OPT-12..., OPT-22...: Acero Inox. (1.4301)
Sensor:	Polisulfona
Cable:	1.5 m PVC
Diámetro de cable:	OPT-1..., OPT-3...: 4.8 mm OPT-2...: 5.4 mm
O-rings:	RPM (with OPT-...10 only)
Tuerca Hexagonal:	Poliamida (solo con OPT-...10)
Sellos:	RPM (solo con OPT-...10)
Temperatura de operación:	-20 a +65 °C
Presión de operación:	max. 10 bar
Salida:	NPN, max. 40 mA PNP, max. 200 mA
Alimentación:	24 V <sub>DC</sub> 0 5 - 16 V <sub>DC</sub> / 19.2 - 28.6 V <sub>DC</sub>
Repetibilidad:	±1 mm
Histeresis:	±1 mm (dependiendo del líquido)
Tiempo de respuesta:	50 µs (con nivel de aumento) 1 s (con caída de nivel) dependiendo de la viscosidad
Protección:	IP 68

## Diagrama de conexión eléctrica

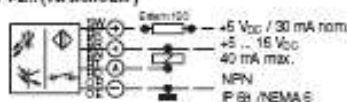
### OPT-3...



### OPT-1... (version OEM)



### OPT-2... (version OEM)



No se responsabiliza por errores editados:  
sujeto a cambios sin previo aviso.

01/18 47/5a / 18



	<b>Full Metal Variable Area Flow Meter and Counter</b> for Liquids and Gases		measuring + monitoring + analysing
---	---	--	--



**Special  
versions up to  
600 bar**

**Nominal  
diameter up to  
DN150**



- Measuring range:  
0.5-5.0...13 000-130 000 L/h water  
0.015-0.15...240-2400 m³/h air  
(20°C, 1.013 bar)
- Accuracy class: 1.6
- pmax: PN 40 - tmax: -40...+350°C
- Connection: Flange DN 15...DN 150
- Material: st. steel 1.4404/1.4571,  
Hastelloy C-22, PTFE
- Option:  
Contacts, analogue output with  
HART® or PROFIBUS-PA®, counter

KOBOLD companies worldwide: ALGERIA, ARGENTINA, AUSTRALIA, AUSTRIA, BELGIUM, BULGARIA, CANADA, CHILE, CHINA, COLOMBIA, CZECH REPUBLIC, DOM. REPUBLIC, EGYPT, FRANCE, GERMANY, INDIA, INDONESIA, IRAN, ITALY, MALAYSIA, MEXICO, MOROCCO, NETHERLANDS, PERU, POLAND, SINGAPORE, SLOVAKIA, SPAIN, SWITZERLAND, THAILAND, TUNESIA, UNITED KINGDOM, USA, VENEZUELA, VIETNAM	KOBOLD Messtechnik GmbH Nordring 22-24 D-65719 Hofheim/Th. ☎ +49 (0) 61 92 239-0 Fax +49 (0) 61 92 2 33 98 E-Mail: info.de@kobold.com Internet: www.kobold.com	<b>Model:</b> BGN
---	--	----------------------

1.056-2009

55

## Full Metal Variable Area Flow Meter and Counter for Liquids and Gases Model: BGN



### Functions

The fluid flows from bottom to top through the meter tube of the flow meter. The float is lifted until an annular gap between the meter ring and the cone-shaped float is produced which corresponds to the flow. The forces acting on the float are in equilibrium. The forces that are mainly acting on the float comprise buoyancy according to the principle of Archimedes, the flow force of the medium and the weight force. Each position of the float corresponds to a flow value measured during calibration, which is transferred to a scale. The BGN variable area flow meter consists of a meter tube with connections, a meter ring, and a conical float. By means of a magnet, the position of the float is transferred to an encapsulated follow magnet, which has been fitted to a pointer axle. The position of a second annular follow magnet fixed on the pointer axle is transferred to the scale by means of the pointer.

### Application

The KOBOLD-BGN meter is suitable for flow measurement of liquid or gaseous products in pipes. It shows the current flow rate in volume or mass per unit in time.

### Applications

Flow measurement, dosing, monitoring, adjusting and control of liquid and gaseous products. The meter's design makes it ideal for processes under difficult and rough operating conditions. The devices are available with additional electrical equipment for process monitoring and control.

- A large spectrum of wetted materials
- Magneto-resistive signal transmission
- Gas- or liquid damping (option)
- Special design for high-pressure and high-temperature applications
- Excellent heat tracing technology (option)
- Double eddy current damping (special version)
- Self draining (special version)
- Backflow stop (special version)
- Flow Controller (special version)

### Technical data

#### Sensor

Materials: 1.4404 (316 L) / 1.4571 (316 Ti), Hastelloy C-22, PTFE, other materials on request

Process connection: Flanges acc. EN 1092, ASME B16.5, DIN 2512, JIS, NPT, screw pipe connection, special connections on request

Nominal pressure: PN 40, ASME C1150/300 (standard) (BGN-S/H)  
PN 16, ASME C1150 (standard) (BGN-P)  
Higher pressure rates optional (max. 600 bar)

Process temperature: -40°C up to +200°C (BGN-S/H without electr. output)  
-40°C up to +150°C (BGN-S/H with electr. output)  
-40°C up to +350°C (BGN-S/H with option V/H/W)  
-40°C up to +125°C (BGN-P)

Ambient temperature: -40°C up to +80°C

#### Accuracy:

Liquid: ± 1.6% of u. r. value (BGN-S/H)  
± 2.0% of u. r. value (BGN-P)  
Gas: ± 1.8% of u. r. value (BGN-S/H)  
± 2.2% of u. r. value (BGN-P)

Additional inaccuracy through transmitter (ES): ± 0.2%

Repeatability: ± 0.5% of u. r. value

Ingress protection: IP 65 (Aluminium housing)  
IP 67 (Stainless steel housing)

#### Certification

Explosion protection: BVS G3 ATEX H/B 112  
CE-Marking: Pressure Equipment Directive 97/23/EG

#### Display

Material: Aluminum (stove-enamelled)  
Stainless steel (as option)

Electr. outputs: Inductive switch (standard)

Inductive switch (safety design)

Microswitch

others on request

Ambient temperature: -40°C up to +80°C (without switch)  
-40°C up to +85°C (with switch)

Full Metal Variable Area Flow Meter and Counter for Liquids and Gases Model: BGN



#### Technical data (continued)

##### Transmitter

- ES with HART®-protocol
- ES with HART®-protocol and 2 NAMUR-switches
- ES with HART®-protocol and 1 NAMUR-switch / 1 pulse output
- ES with Profibus-PA®
- ES with HART®-protocol and counter module

Power supply: 14 - 30 V<sub>DC</sub>  
 Output: passive, galvanically isolated  
 Currency: 4 - 20 mA  
 Binary 1 and 2: UI = 30 V, I = 20 mA, P<sub>I</sub> = 100 mW  
 Input Binary: Counter reset  
 (only for ES with counter module)  
 Ambient temperature: -40 °C up to +70 °C

##### Certification

Explosion protection: DMT 00 ATEX E 075  
 Type of protection:  II 2G EEx Ia IIC T6  
 CE-Marking: Explosion Protection Directive  
 94 / 9 / EG

##### Additional options and special versions:

- Other materials
- Other flange versions and sizes
- Certifications
- Display with pressure compensations  
 against condensate build up
- Microswitch
- Inductive switches with safety design
- Double eddy current damping
- Self draining
- Backflow stop
- Flow controller
- specially low pressure loss

1 / 65-200

No responsibility taken for errors;  
 subject to change without prior notice.

[www.kobold.com](http://www.kobold.com)

57

Full Metal Variable Area Flow Meter and Counter for Liquids and Gases Model: BGN



Order details for liquids (Order example: BGN-S 105C A 0 000 S 1 Q)

Model	Measuring range water [L/h]	Measuring range air at 20°C, 1013 mbar [m³/h]	Nominal diameter	Pressure stage (DIN-flange)	Max. pressure loss [mbar]	Code <sup>®</sup> flange DIN EN 1092-1 Form B1	Code <sup>®</sup> flange ASME Class 150 RF
BCN-S = st. st. measuring tube	0,5 - 5 (0,7 - 7) <sup>1/4</sup>	0,015 - 0,15	DN 15, (1/2")	PN 40	40	305B A	202R A
	1 - 10 (1,2 - 12) <sup>1/4</sup>	0,03 - 0,3	DN 15, (1/2")	PN 40	44	305B B	202R B
	1,6 - 16 (2 - 20) <sup>1/4</sup>	0,145 - 0,49	DN 15, (1/2")	PN 40	40	305B C	202R C
	2,5 - 25 <sup>1/4</sup>	0,075 - 0,75	DN 15, (1/2")	PN 40	40	305B D	202R D
	4 - 40 <sup>1/4</sup>	0,13 - 1,3	DN 15, (1/2")	PN 40	40	305B E	202R E
	5 - 50	0,15 - 1,5	DN 15, (1/2")	PN 40	40	305B F	202R F
	7 - 70	0,2 - 2,1	DN 15, (1/2")	PN 40	40	305B G	202R G
	10 - 100	0,3 - 3,0	DN 15, (1/2")	PN 40	60	305B H	202R H
	16 - 160	0,5 - 4,6	DN 15, (1/2")	PN 40	60	305B I	202R I
	25 - 250	0,7 - 7,0	DN 15, (1/2")	PN 40	60	305B J	202R J
	40 - 400	1,0 - 11	DN 15, (1/2")	PN 40	70	305B K	202R K
	60 - 600	1,7 - 17	DN 15, (1/2")	PN 40	90	305B L	202R L
	0,5 - 5 (0,7 - 7) <sup>1/4</sup>	0,015 - 0,15 <sup>1/4</sup>	DN 25, 1"	PN 40	40	309B A	203R A
	1 - 10 (1,2 - 12) <sup>1/4</sup>	0,03 - 0,3 <sup>1/4</sup>	DN 25, 1"	PN 40	44	309B B	203R B
	1,6 - 16 (2 - 20) <sup>1/4</sup>	0,145 - 0,49 <sup>1/4</sup>	DN 25, 1"	PN 40	40	309B C	203R C
	2,5 - 25 <sup>1/4</sup>	0,075 - 0,75 <sup>1/4</sup>	DN 25, 1"	PN 40	40	309B D	203R D
	4 - 40 <sup>1/4</sup>	0,13 - 1,3 <sup>1/4</sup>	DN 25, 1"	PN 40	40	309B E	203R E
	5 - 50	0,15 - 1,5	DN 25, 1"	PN 40	40	309B F	203R F
	7 - 70	0,2 - 2,1	DN 25, 1"	PN 40	40	309B G	203R G
	10 - 100	0,3 - 3,0	DN 25, 1"	PN 40	60	309B H	203R H
	16 - 160	0,5 - 4,6	DN 25, 1"	PN 40	60	309B I	203R I
	25 - 250	0,7 - 7,0	DN 25, 1"	PN 40	60	309B J	203R J
	40 - 400	1,0 - 11	DN 25, 1"	PN 40	70	309B K	203R K
	60 - 600	1,7 - 17	DN 25, 1"	PN 40	90	309B L	203R L
BCN-P = st. st. measuring tube, PTFE-casing	100 - 1000	3 - 30	DN 25, 1"	PN 40	60	309B M	203R M
	160 - 1600	4 - 46	DN 25, 1"	PN 40	70	309B N	203R N
	250 - 2500	7 - 70	DN 25, 1"	PN 40	100	309B P	203R P
	400 - 4000 <sup>1/2</sup>	11 - 110 <sup>1/2</sup>	DN 25, 1"	PN 40	240	309B Q	203R Q
BCN-H = Hastalloy measuring tube	250 - 2500	7 - 70	DN 40, 1 1/2"	PN 40	50	317B P	205R P
	400 - 4000	11 - 110	DN 40, 1 1/2"	PN 40	120	317B Q	205R Q
	600 - 6000	17 - 170	DN 40, 1 1/2"	PN 40	180	317B R	205R R
	400 - 4000	11 - 110	DN 50, 2"	PN 40	90	321B Q	206R Q
	600 - 6000	17 - 170	DN 50, 2"	PN 40	90	321B R	206R R
	1000 - 10000	29 - 290	DN 50, 2"	PN 40	110	321B S	206R S
	1600 - 16000	46 - 460	DN 50, 2"	PN 40	230	321B T	206R T
	2500 - 25000 <sup>1/2</sup>	70 - 700 <sup>1/2</sup>	DN 50, 2"	PN 40	500	321B U	206R U
	1600 - 16000	46 - 460	DN 80, 3"	PN 40	70	331B T	208R T
	2500 - 25000	70 - 700	DN 80, 3"	PN 40	100	331B U	208R U
	4000 - 40000	110 - 1100	DN 80, 3"	PN 40	350	331B V	208R V
	4000 - 40000	110 - 1100	DN 100, 4"	PN 16	120	335B V	210R V
	6000 - 60000	170 - 1700	DN 100, 4"	PN 16	360	335B W	210R W
	9000 - 90000 <sup>1/2</sup>	240 - 2400 <sup>1/2</sup>	DN 100, 4"	PN 16	600	335B X	210R X
	10000 - 100000 <sup>1/2</sup>	-	DN 100, 4"	PN 16	on request	335B Z	210R Z
	4000 - 40000 <sup>1/2</sup>	on request	DN 125, 5"	PN 16	on request	340B X	211R X
	9000 - 90000 <sup>1/2</sup>	on request	DN 125, 5"	PN 16	on request	340B Y	211R Y
	10000 - 100000 <sup>1/2</sup>	on request	DN 125, 5"	PN 16	on request	340B Z	211R Z
	10000 - 100000 <sup>1/2</sup>	on request	DN 150, 6"	PN 16	on request	345B Z	212R Z
	13000 - 130000 <sup>1/2</sup>	on request	DN 150, 6"	PN 16	on request	345B 4	212R 4



Continuation order details for liquids (Order example: BGN-S 105C A 0 000 S 1 0)

Heating*/cooling	Damping*/spring stop	Draining body	Certificates	Display	Scale	Electrical output
<b>0</b> = without <b>1</b> = with heating Enmato 12 mm <b>2</b> = with heating DIN-flange DN 15/PN 40 <b>3</b> = with heating ANSI-flange 1/2" Class 150	<b>0</b> = without <b>R</b> = with flow restrictor for gas measuring <b>F</b> = with liquid damping <b>C</b> = with gas damping <b>A</b> = with spring stop <b>S</b> = with gas damping and spring stop	<b>0</b> = without draining body <b>L</b> = with self draining body	<b>0</b> = without certificate <b>1</b> = Certificate of compliance with the order 2.1 <b>2</b> = Certificate of compliance with the order 2.2 <b>B</b> = Inspection certificate with material certificate 3.1 <b>C</b> = Inspection certificate with material certificate 3.2	<b>S</b> = aluminium <b>V</b> = aluminium, assembled at distance up to 350 °C <b>E</b> = stainless steel <b>H</b> = stainless steel, assembled at distance up to 350 °C <b>T</b> = aluminium with pressure compensation <b>W</b> = aluminium with pressure compensation, assembled at distance up to 350 °C	<b>Water</b> <b>1</b> = %-scale <b>2</b> = measuring range <b>Media</b> <b>4</b> = %-scale <b>5</b> = measuring range Please specify media data in plain text (see below)	<b>0</b> = without <b>1</b> = 1 inductive switch <b>2</b> = 2 inductive switches <b>6</b> = transmitter ES with HART*, EEx ia, 4-20 mA <b>7</b> = transmitter ES with HART*, EEx ia, 4-20 mA and 2 Namur-switches <b>8</b> = transmitter ES with HART*, EEx ia, 4-20 mA, 1 Namur-switch and 1 pulse output <b>9</b> = electrical transmitter with Profibus PA*, EEx ia <b>I</b> = 4-20 mA with HART* and counter module

Reference conditions: water at 20°C, 1 mPas

\* Different measuring range for model BGN-P (PTFE-casing)

\* Other flange connections: Form B1, N, D, JIS or Class 300 on request

\* Not for model BGN-P (PTFE-casing)

\* Not for model BGN-H (Hastelloy)

\* Only up to measuring range: 40 L/h

\* Only for nominal diameter DN 100

\* Damping spring stop not possible

\* Only available with forward advanced indicating housing

\* Not available with heating/cooling

For the right design of the flowmeter

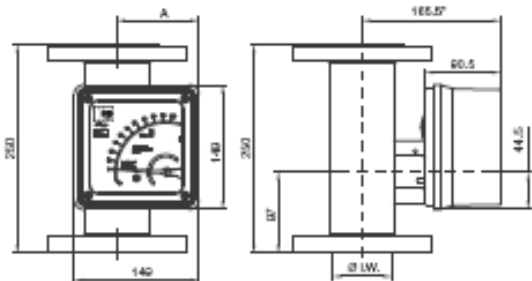
we need the following data:

measuring range with unit, measured media, process temperature and pressure, viscosity, operating density (liquids), norm density (gases), mechanical connection

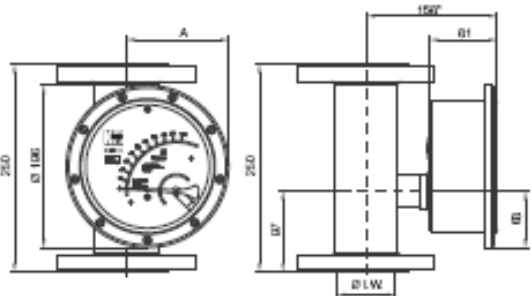


Dimensions

Display: aluminium



Display: stainless steel



DN	PN	I. W.	A (aluminium)	A (st. steel)
15	40	26	74	100
25	40	32	77	103
40	40	46	85	110
50	40	70	98	123
80	40	102	114	140
100	16	125	127	153
125	16	150	142	166
150	16	159	148	171

Dimensional deviations:  
\* +100 mm with forward advanced display and generally at DN125 and DN150



**Density meter**



measuring  
•  
monitoring  
•  
analysing



- Especially suited for multiphase media
- Mechanical density measuring and monitoring of liquids in pipes
- No bypass required
- Robust design
- Clear 90°-scale
- Transmitter optional with HART® or PROFIBUS-PA



01 / 03/2006

KOBOLD companies worldwide:  
ALGERIA, ARGENTINA, AUSTRALIA, AUSTRIA, BELGIUM, BULGARIA, CANADA, CHILE,  
CHINA, COLOMBIA, CZECHIA, DOMINICAN REPUBLIC, EGYPT, FRANCE, GERMANY,  
GREAT BRITAIN, INDIA, INDONESIA, IRAN, ITALY, MALAYSIA, MEXICO, MOROCCO,  
NETHERLANDS, PERU, PHILIPPINES, POLAND, ROMANIA, SINGAPORE, SLOVAKIA,  
SPAIN, SWITZERLAND, THAILAND, TUNISIA, USA, VENEZUELA, VIETNAM

KOBOLD Messing GmbH  
Nordring 22-24  
D-65719 Hofheim/Ts.  
☎ +49 (0) 61 62 236-0  
☎ +49 (0) 61 62 236-60  
E-Mail: info@kobold.com  
Internet: www.kobold.com

Model:  
DWT



## Density meter Model: DWF



### Description

The displacer rod, which is attached to a measuring spring by a chain, immerses into the liquid and is subject to a buoyant force proportional to the mass of the displaced liquid. Every change in the weight of the rod corresponds to a change in the length of the spring and is therefore a measure of the liquid level. The longitudinal expansion of the spring, i.e. the travel of the rod, will be transmitted from the measuring space to the indicator unit by means of a magnetic coupling. The basic version of the indicator unit consists of a scale with a pointer for displaying the liquid level. As an option, the indicator unit may be equipped with electrical transmitters for remote display or with limit switches.

If the device cannot be installed from above, because, for example, a stirrer is mounted in the container, a special displacement vessel is available for lateral installation.

Since the buoyancy of the displacer rod depends on the density (g/L or kg/m<sup>3</sup>) of the measured medium, it must have been designed for the specific liquid to be measured.

### Application examples

- Density metering, -monitoring, and control of liquid media in pipes.
- The meter's design as a pure mechanical device is excellent for processes under difficult and rough operating conditions.
- The device is available with additional electrical equipment for process monitoring and control.
- A large spectrum of wetted materials
- Magneto-resistive signal transmission
- High-temperature application (option)
- High-pressure application (option)
- Excellent heat tracing technology (option)

### Technical Data

Density range:	700 g/L – 1000 g/L
Measuring span:	50 g/L – 600 g/L
Materials sensor:	Stainless steel, Hastelloy other materials on request
Materials display:	Aluminum (stove-annealed), Stainless steel (option)
Process connection:	CN 25 ASME 1" (TS/K1) CN 50 ASME 2" (TS/K 2, 3) range acc. EN 1062, ASME B16.5, DIN2512, special connections on request
Nominal pressure:	PN 16, ASME Cl150 (standard) higher pressure rates up to 400 bar optional
Process temperature:	-20 °C... +150 °C
Ambient temperature:	-20 °C... +60 °C -20 °C... +65 °C (with switch) -40 °C... +70 °C (Transmitter)
Ingress protection	
Sensor:	IP 65/67 (EN60529)
Transmitter:	IP 20 (EN60529)

### Flow range

Model	Flow range <sup>a</sup>
1	2500 L/h
2	5000 L/h
3	10000 L/h

Reference condition: according to ISO 770:  
Water at 20 °C



Density meter Model: DWF



Outputs:	Inductive switch inductive switch (safety design) microswitch others on request	<b>Accuracy</b>	
Transmitter:	EB with HART®-protocol EB with HART®-protocol and 2 NAMUR-switches EB with HART®-protocol and 1 NAMUR-switch / 1 pulse output EB with Profibus-PA	Span	Accuracy
		50 g/L	± 1,25 g/L
		100 g/L	± 2,00 g/L
		200 g/L	± 3,00 g/L
		300 g/L	± 4,50 g/L
		500 g/L	± 5,00 g/L
Power supply:	14 - 30 V <sub>DC</sub>	± 0,2 % with transmitter (FS)	
Output:	passive, galvanically isolated	<b>Certification</b>	
Current:	4-20 mA	Explosion protection:	BVS 03 ATEX HIB 112
Binary 1 and 2:	U <sub>i</sub> = 30 V, I <sub>i</sub> = 20 mA, P <sub>i</sub> = 100 mW	(Sensor)	
		Explosion protection:	DMT 00 ATEX E 075
		(Transmitter)	
		Type of protection:	II 2G EEx ia IIC T6

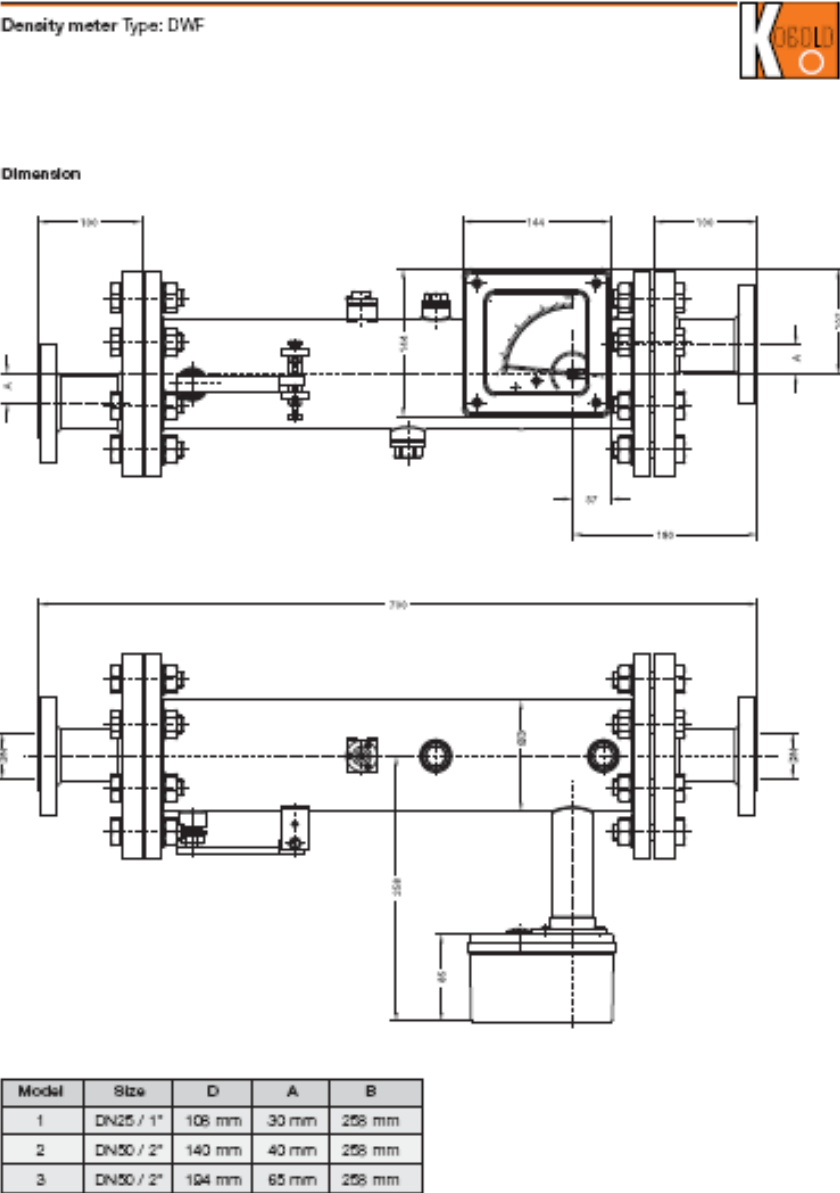


01/10/2006

No responsibility taken for wrong  
subject to change without prior notice.

[www.kobold.com](http://www.kobold.com)

3



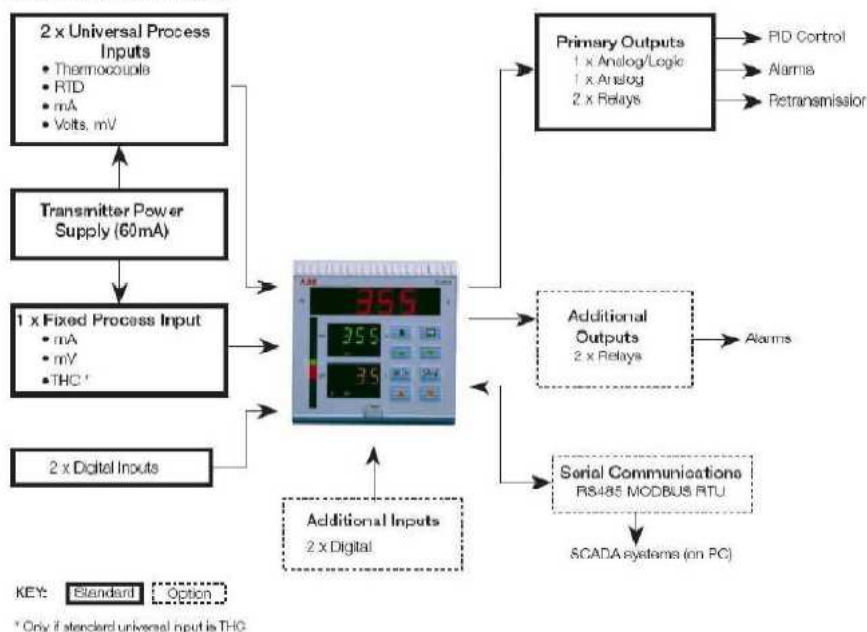
- **Controlador PID con estrategias de control múltiples**
  - controlador de bucle simple, conexión antiozono, cascada, relación, estación automática/manual y reparto analógico.
- **Tres pantallas LED grandes con gráfico de barras de desviación**
  - pantalla clara y fácil de seguir con teclas de función de colores coordinados
- **Amplias capacidades de entrada/salida**
  - tres entradas analógicas, dos salidas analógicas, hasta cuatro relés y cuatro unidades digitales multibit MODBUS RS485 para una flexibilidad total
- **Seguridad del proceso y seguridad de planta**
  - alarma de interrupción de bucle, controlador del proceso, protección por contraseña y recuperación de alimentación inteligente
- **Software de configuración para facilitar la instalación**
  - acceso a características avanzadas y parámetros ocultos para reducir el tiempo de configuración
- **Funciones avanzadas de ahorro de costos**
  - bloques matemáticos, ecuaciones lógicas, alarmas en tiempo real, linealizadores adaptados y conexión por software
- **Monitor de Eficacia de Control (CEM) exclusivo**
  - dos algoritmos de autoajuste más ajuste fino manual utilizando CEM para lograr un rendimiento óptimo
- **Protección del panel frontal IP66/NEMA4X**
  - confiabilidad en los entornos más adversos
- **Perfil de rampa/ meseta**
  - 30 segmentos y 9 partes, configuración mediante el software para PC o panel frontal



**C355 – controlador de bucle simple avanzado en un compartimento pequeño, formato 1/4 DIN**

**ABB**

### Conexiones de Proceso



### Especificaciones

#### Resumen

17 plantillas de aplicaciones: Bucle simple, Cascada, Conector anticipante, Velocidad Automático/Manual

Dos opciones de autoajuste

Monitor de Eficacia de Control (CEM)

30 segmentos y 9 perfiles

Software de configuración

Panel frontal: PPA/NPMA4X

#### Operación

##### Pantalla

1 x 4 dígitos, 14mm LED (rojo) – variable del proceso

1 x 4 dígitos 5mmLED (verde) – punto de ajuste

1 x 3 dígitos 5mmLED (amarillo) – salida

1 x gráfico de barras de desviación de 24 segmentos

##### Configuración

Configuración básica mediante teclas del panel frontal o PC

Software de configuración de características de avanzada por PC

##### Seguridad

Menús protegidos por contraseñas

#### Funciones Estándar

##### Estrategias de control

Bucle único, Estación automático/manual, Soporte analógico, Osgador indicador/manual, Cascada\*, Corrección anticipante, Retención

##### Tiempo de salida

Control proporcional, Tiempo proporcional, Válvula motorizada\*\* encendido/apagado (con y sin realimentación), Calor/frío.

##### Parámetros de control

Cuatro juegos de configuraciones PI seleccionables mediante señales digitales

##### Puntos de ajuste

Local, remoto y cuatro puntos de ajuste tipo locales, seleccionables mediante señales digitales

30 segmentos y 9 perfiles

##### Salidas configuradas

Tres valores de salida predefinidos seleccionables mediante señales digitales

##### Autoajuste

A pedido para 1% de onda o mínimo rebaso de línea

##### Alarmas de proceso


Cantidad	9
Tipos	Proceso alto/bajo, Salida alta/baja, Desviación alta/baja
Histeresis	Nivel y tiempo **
Habilitar/inhabilitar alarma	Habilitar/inhabilitar alarmas mediante señal digital

##### Alarmas en tiempo real \*\*

Cantidad	2
Programable	Hora/día y duración

\* La válvula motorizada sin realimentación no está disponible en la plantilla en cascada.

\*\* Se accede a través del software de configuración




## HIGH SELECTOR

TYPE 112-21A

## LOW SELECTOR

TYPE 112-20A

- Selects the highest or lowest of up to six inputs
- Signal conversion e.g. 4-20mA to 0-10V
- Wide range of inputs & outputs
- Isolated voltage, current sink or current source outputs
- AC or DC powered versions
- Wall or DIN rail mounting
- Current loop integrity feature



These instruments will provide an output which is equal, or proportional, to the highest input signal (112-21A) or the lowest input signal (112-20A). The output can be converted into a signal of a different type.

**Inputs**

All inputs should be of the same current or voltage spans e.g. all 4-20mA or all 0-10V, etc.

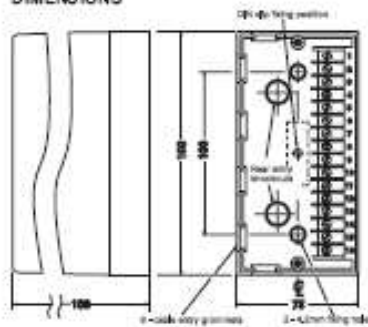
**Input current loop integrity**

For current inputs, when the plug-in module is removed, signal loops are maintained via shunt resistors mounted between input terminals in the base section. These resistors are matched to the unit for optimum accuracy.

**Output**

The output signal may be of a different type to the input signal and can be factory configured for most of the common process signal types. A current sink output version is also available which functions as a two-wire transmitter and sinks 4-20mA from an external power source.

**DIMENSIONS**



**Information required when ordering:**

- ☐ Function i.e. High Selector or Low Selector
- ☐ Input signals *MS* should be of the same spans and be able to share a common connection (select from options overleaf)
- ☐ Number of inputs (2 to 6 can be accommodated)
- ☐ Output signal (select from options overleaf)
- ☐ Supply voltage and frequency
- ☐ Whether a DIN Rail Mounting clip is required

## SPECIFICATION

### INPUTS

**NB.** The required type must be specified when ordering.  
All inputs must be able to share a common connection. If they cannot be connected together, a Signal Isolator e.g. type B12-SI must be used to isolate the inputs.

0-10 mA into 100 ohms  
0-20 mA into 50 ohms  
4-20 mA into 62.5 ohms  
0-5V into greater than 1 M ohms  
1-5V into greater than 1 M ohms  
(Other inputs available to order)

### FUNCTION

112-20: Output = (proportional to lowest input)  
112-21: Output = (proportional to highest input)

### OUTPUTS

**NB.** The required type must be specified when ordering.

0-10 mA into 2000 ohms max.  
0-20 mA into 1000 ohms max.  
4-20 mA into 1000 ohms max.  
0-5V into 500 ohms min.  
1-5V into 500 ohms min.  
Current Sink 4-20 mA @ 50 Vdts max.  
(Other outputs available to order)

### CALIBRATED ACCURACY

Set at 100% to be within  $\pm 0.1\%$  FSD

### LINEARITY ERROR

$\leq \pm 0.1\%$  FSD

### SUPPRESSION/ELEVATION ERROR

$\leq \pm 0.1\%$  FSD

### CURRENT INPUT SHUNT ERROR

For current inputs, the instrument and shunt resistors (mounted in the base section of the module) are calibrated as matched pairs. An error of  $\leq \pm 0.1\%$  can be expected if the instrument is used with unmatched input resistors.

### OUTPUT RIPPLE

$\leq 0.1\%$  RMS of FSD.

### LOAD RESISTANCE EFFECT

$\leq 0.001\%$  of span/100 ohms change.

### ISOLATION

The inputs are commoned together but are isolated from the output and the power supply.  
Maximum voltage 250V RMS or 400V DC  
Resistances between input, output or power supply  $\geq 50 \times 10^6$  ohms measured at 1000 V DC.

### STABILITY

Over 24 hours  $\pm 0.1\%$  FSD.  
Over 1 year  $\pm 0.25\%$  FSD.

### INPUT OVER-RANGE CAPABILITY

Voltage inputs 250 volts RMS or DC max.  
Current inputs: 0.5W max.

### TEMPERATURE COEFFICIENTS

Zero:  $\pm 0.02\%$  span/ $^{\circ}$ C  
Span:  $\pm 0.02\%$  span/ $^{\circ}$ C

### ENVIRONMENTAL

Temperature range:  
operating -10 to +50 deg C;  
storage -20 to +70 deg C  
Humidity: 0-95% RH non-condensing

### SUPPLY VOLTAGE REJECTION

Output change  $< 0.01\%$  span/% supply change.

### POWER SUPPLY

A LED indicates when the power supply is connected.  
Standard AC: 110, 220 or 240V  $\pm 10\%$  50/60Hz; 5VA  
Fuse (internal) 100mA quick-blow (20 x 5mm)  
Optional DC: 12, 24 or 48V -10% to +20%; 3.5W  
Fuse (internal) 250mA anti-surge (20 x 5mm)

### ENCLOSURE DETAILS

Base: Phenol (black)  
Cover: Polystyrol (light grey)  
Protection: IP40

### SAFETY & EMC

Safety: EN61010-1 Immunity: EN50082-1  
Emissions: EN50081-1 CE certified

### WEIGHT

Approximately 0.5 kg



**WARNING! THIS UNIT CAN BE MAINS POWERED, AND ALL INPUTS TO IT MUST BE ISOLATED FROM DANGEROUS VOLTAGES BEFORE THE FRONT COVER IS REMOVED. LIVE TERMINALS WILL BE EXPOSED.**

Continuous development may necessitate changes in these details without notice

**SIL**

## STROUD INSTRUMENTS LTD.

36-40 Slad Road, Stroud, Glos. GL5 1QW, England  
Telephone: +44 (0)1453 765433 Fax No: +44 (0)1453 764256  
[www.sil.co.uk](http://www.sil.co.uk)

01 0 06A/P Rev0







## WARRANTY/DISCLAIMER

OMEGA ENGINEERING, INC. warrants this unit to be free of defects in materials and workmanship for a period of **13 months** from date of purchase. OMEGA's Warranty adds an additional one (1) month grace period to the normal **one (1) year product warranty** to cover handling and shipping time. This ensures that OMEGA's customers receive maximum coverage on each product.

If the unit malfunctions, it must be returned to the factory for evaluation. OMEGA's Customer Service Department will issue an Authorized Return (AR) number immediately upon phone or written request. Upon examination by OMEGA, if the unit is found to be defective, it will be repaired or replaced at no charge. OMEGA's WARRANTY does not apply to defects resulting from any action of the purchaser, including but not limited to mishandling, improper interfacing, operation outside of design limits, improper repair, or unauthorized modification. This WARRANTY is VOID if the unit shows evidence of having been tampered with or shows evidence of having been damaged as a result of excessive corrosion; or current, heat, moisture or vibration; improper specification; misapplication; misuse or other operating conditions outside of OMEGA's control. Components which wear are not warranted, including but not limited to contact points, fuses, and triacs.

OMEGA is pleased to offer suggestions on the use of its various products. However, OMEGA neither assumes responsibility for any omissions or errors nor assumes liability for any damages that result from the use of its products in accordance with information provided by OMEGA, either verbal or written. OMEGA warrants only that the parts manufactured by it will be as specified and free of defects. OMEGA MAKES NO OTHER WARRANTIES OR REPRESENTATIONS OF ANY KIND WHATSOEVER, EXPRESS OR IMPLIED, EXCEPT THAT OF TITLE, AND ALL IMPLIED WARRANTIES INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE HEREBY DISCLAIMED. LIMITATION OF LIABILITY: The remedies of purchaser set forth herein are exclusive, and the total liability of OMEGA with respect to this order, whether based on contract, warranty, negligence, indemnification, strict liability or otherwise, shall not exceed the purchase price of the component upon which liability is based. In no event shall OMEGA be liable for consequential, incidental or special damages.

CONDITIONS: Equipment sold by OMEGA is not intended to be used, nor shall it be used: (1) as a "Basic Component" under 10 CFR 21 (NRC), used in or with any nuclear installation or activity; or (2) in medical applications or used on humans. Should any Product(s) be used in or with any nuclear installation or activity, medical application, used on humans, or misused in any way, OMEGA assumes no responsibility as set forth in our basic WARRANTY/DISCLAIMER language, and, additionally, purchaser will indemnify OMEGA and hold OMEGA harmless from any liability or damage whatsoever arising out of the use of the Product(s) in such a manner.

## RETURN REQUESTS/INQUIRIES

Direct all warranty and repair requests/inquiries to the OMEGA Customer Service Department. BEFORE RETURNING ANY PRODUCT(S) TO OMEGA, PURCHASER MUST OBTAIN AN AUTHORIZED RETURN (AR) NUMBER FROM OMEGA'S CUSTOMER SERVICE DEPARTMENT (IN ORDER TO AVOID PROCESSING DELAYS). The assigned AR number should then be marked on the outside of the return package and on any correspondence.

The purchaser is responsible for shipping charges, freight, insurance and proper packaging to prevent breakage in transit.

FOR **WARRANTY** RETURNS, please have the following information available BEFORE contacting OMEGA:

1. Purchase Order number under which the product was PURCHASED,
2. Model and serial number of the product under warranty, and
3. Repair instructions and/or specific problems relative to the product.

FOR **NON-WARRANTY** REPAIRS, consult OMEGA for current repair charges. Have the following information available BEFORE contacting OMEGA:

1. Purchase Order number to cover the COST of the repair,
2. Model and serial number of the product, and
3. Repair instructions and/or specific problems relative to the product.

OMEGA's policy is to make running changes, not model changes, whenever an improvement is possible. This affords our customers the latest in technology and engineering.

OMEGA is a registered trademark of OMEGA ENGINEERING, INC.

© Copyright 2002 OMEGA ENGINEERING, INC. All rights reserved. This document may not be copied, photocopied, reproduced, translated, or reduced to any electronic medium or machine-readable form, in whole or in part, without the prior written consent of OMEGA ENGINEERING, INC.



### IMPORTANT

### STORING

---

### INSTALLATION

Note: Pictures shown as block diagrams: not to scale or diagrammatically

#### 1. Dimensions in mm

#### 2. Requirements

✓

-40°C → +80°C

Protection IP65 in operating conditions

✗

Recalibration Required

✗

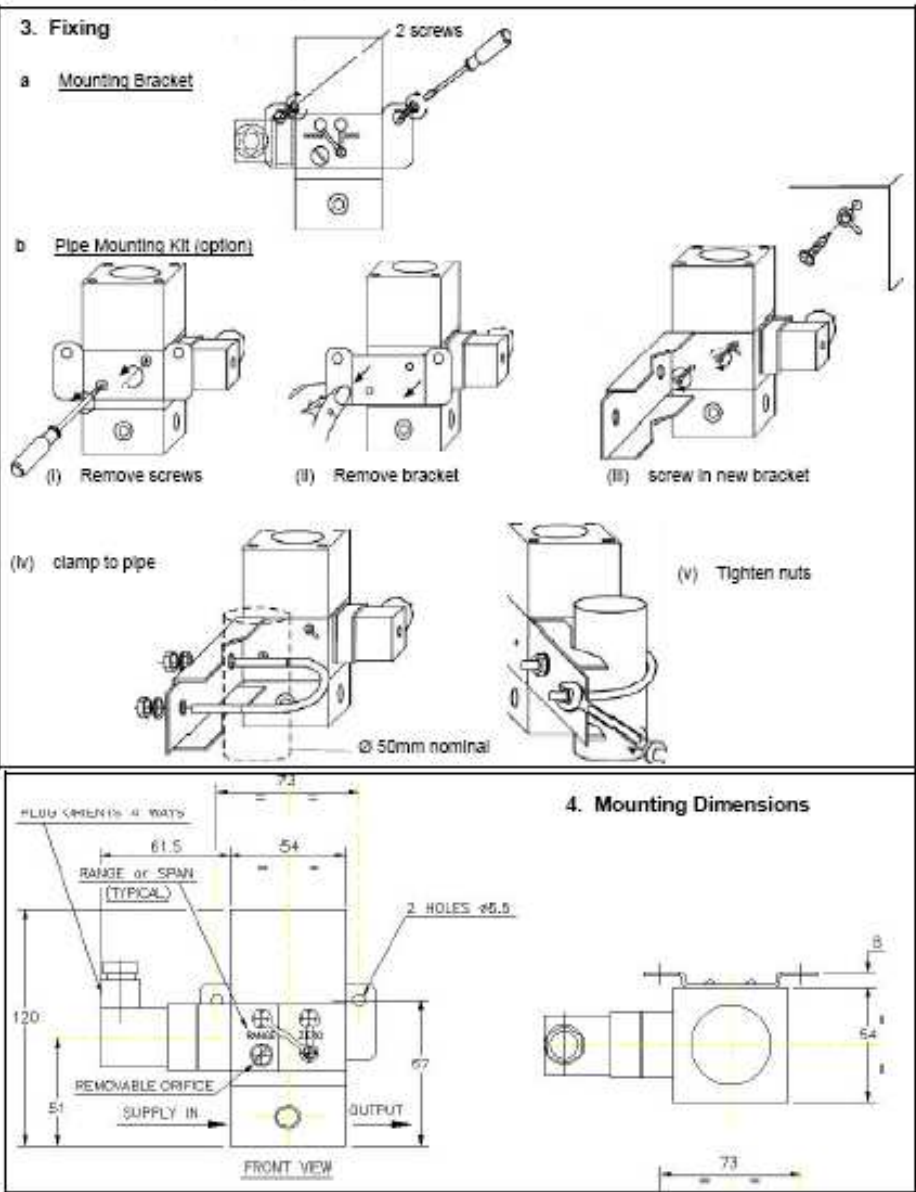
To conform with the Health and Safety at Work Act 1974 our product should be installed, used and maintained in accordance with:

- 1 Normal Safety Procedures
- 2 The installation and operating instructions provide for each instrument.
- 3 BS 6379 for general applications or ANSI/ISA-57.3 1975
- 4 BS 5345 for hazardous area applications

✗

Do not block side vents

INSTALLATION (continued)



### 5. Make Pneumatic Connections

### 6. Remove Connector

### 7. Expose Terminals

### 8. Insert Cable

View Looking at Pins of Instrument

### 9. Assemble and Fit Connector

### 10. Air Supply

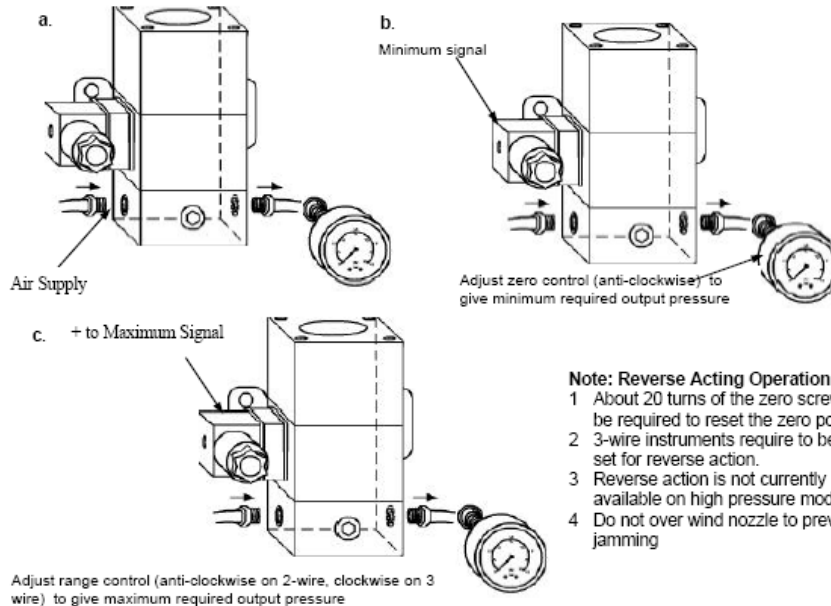
BS 6739: 1986  
Dust < 5 micron  
Oil: < 1ppm mass  
Pressure: 1 bar > P2

Dewpoint at least 10°C below minimum anticipated ambient temperature

	Suitable LP Converter	Up to 6 LP Converters
Particle /Water Removal Filter	Type F72G with 5 micron Element	Type F74G with 5 micron Element
Oil/Particle/ Water Removal Filter	Type F72C	F74C
Regulator	Type R72	Type R74
Combination Filter/Regulator	Type B72 with 5 micron Element (=F72+R72)	Type B74 with 5 micron Element

## 11. Calibration

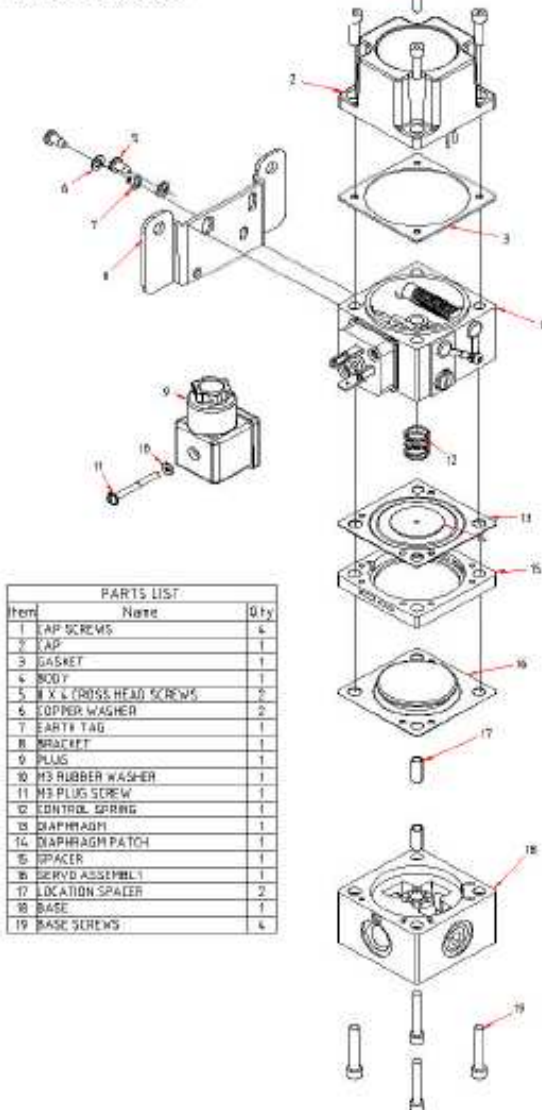
When the instrument is first installed, or after a long period of downtime, a moderate zero shift is normal. This is due to the rubber diaphragms which are stretched by the internal springs. After a few operations, the instrument will settle into its normal operating condition. It is recommended that, under these circumstances, instruments should be exercised by alternately applying zero and full scale signals several times. Zero calibration should then be carried out.



## 12. Maintenance

Care must also be taken to re-align transfer passages correctly during reassembly of the instrument. Routine maintenance consists of replacing the restrictor screw if the internal orifice becomes blocked.

### Parts Breakdown



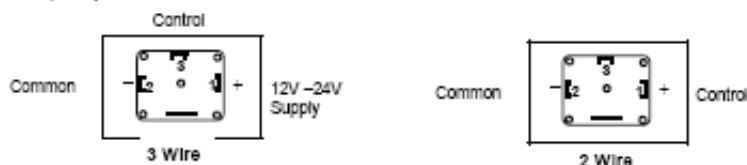
PARTS LIST		
Item	Name	Qty
1	CAP SCREWS	4
2	CAP	1
3	GASJET	1
4	BODY	1
5	M X 6 (ROSS HEAD) SCREWS	2
6	COPPER WASHER	2
7	EARTH TAG	1
8	BRAKET	1
9	PLUG	1
10	M3 RUBBER WASHER	1
11	M3 PLUG SCREW	1
12	CONTROL SPRING	1
13	DIAPHRAGM	1
14	DIAPHRAGM PATCH	1
15	SPACER	1
16	SERVO ASSEMBLY	1
17	LOCATION SPACER	2
18	BASE	1
19	BASE SCREWS	4

### 13. Product Variations

#### 3 Wire Versions

These are products designed for electrical control signals which differ from the normal 4-20, 0-60mA signals. An internal amplifier is fitted to translate the control signal into the required current through the coil. An external 12V-24V DC signal is required to power the amplifier, which should be capable of providing 25mA (low pressure) or 65mA. (high pressure)

It is essential that wiring be carried out correctly as incorrect wiring may destroy the amplifier completely.



#### E-P Versions (Voltage Controlled converters)

These are available in the 2 and 3 wire versions. The two wire versions are recalibrated I/P converters with a suitable buffer resistor in series with the coil to adjust the sensitivity

**Captured Exhaust Versions:** Designed for use with certain gases. This part must be connected to a suitable exhaust arrangement e.g. stack pipe. N.B. Check before installation.

**Warning:** Not for use where no escape of gas is permitted to escape to the environment due to the constant bleed of the unit

### 14. Troubleshooting Guide

Problem	Possible Causes	Suggested Action
No Output Pressure	Reversed Current polarity or faulty connections	Check wiring and signal continuity with milliammeter
	Broken internal wiring	Check instrument resistance with ohmmeter. Repair if faulty.
	No air supply	Correct
Maximum output not available	Insufficient supply pressure	Adjust
	Damaged coil or nozzle	Return to Factory for Repair
	Oil contamination	Replace instrument
	Clogged restrictor	Replace
Zero will not adjust	Worm disengaged with pinion (after excessive adjustment)	Re-engage components
Zero calibration error on initial turn-on	A small error is normal	Exercise instrument several times and retest

#### Materials of Construction:

Lid: Nylon 66; Magnet: Permanent Neodymium Iron Boron; Magnet Ironwork: Zinc plated mild steel  
Flapper: Beryllium Copper; Nozzle: Brass



<b>OMEGAnet® Online Service</b> <a href="http://www.omega.com">www.omega.com</a>	<b>Internet e-mail</b> <a href="mailto:info@omega.com">info@omega.com</a>
---	--

**Servicing North America:**

<b>USA:</b> <u>ISO 9001 Certified</u>	One Omega Drive, Box 4047 Stanford CT 06907-0047 Tel: (203) 359-1660 e-mail: <a href="mailto:info@omega.com">info@omega.com</a> FAX: (203) 359-7700
<b>Canada:</b>	976 Berger Laval (Quebec) H7L 5A1 Tel: (514) 856-6928 e-mail: <a href="mailto:info@omega.ca">info@omega.ca</a> FAX: (514) 856-6886

**For immediate technical or application assistance:**

<b>USA and Canada:</b>	Sales Service: 1-800-826-6342 / 1-800-TC-OMEGA® Customer Service: 1-800-622-2978 / 1-800-622-BEST® Engineering Service: 1-800-872-9436 / 1-800-USA-WHEN® TELEX: 996404 EASYLINK 62968934 CABLE: OMEGA
<b>Mexico:</b>	En Español: (001) 203-359-7803 FAX: (001) 203-359-7807 e-mail: <a href="mailto:espano@omega.com">espano@omega.com</a> <a href="mailto:info@omega.com.mx">info@omega.com.mx</a>


**Servicing Europe:**

<b>Benelux:</b>	Postbus 8034, 1180 LA Amsterdam, The Netherlands Tel: +31 (0)20 3472121 Toll Free in Benelux: 0800 0993344 e-mail: <a href="mailto:sales@omegaeng.nl">sales@omegaeng.nl</a> FAX: +31 (0)20 6434643
<b>Czech Republic:</b>	Rude armády 1868, 733 01 Kacvina 8 Tel: +420 (0)69 6311899 Toll Free: 0800-1-66342 e-mail: <a href="mailto:info@omegashop.cz">info@omegashop.cz</a> FAX: +420 (0)69 6311114
<b>France:</b>	11, rue Jacques Cartier, 78280 Guyancourt, France Tel: +33 (0)1 61 37 29 00 Toll Free in France: 0800 466 342 e-mail: <a href="mailto:sales@omega.fr">sales@omega.fr</a> FAX: +33 (0)1 30 57 54 27
<b>Germany/Austria:</b>	Daimlerstrasse 26, D-75392 Deckenpfron, Germany Tel: +49 (0)7056 9398-0 Toll Free in Germany: 0800 639 7678 e-mail: <a href="mailto:info@omega.de">info@omega.de</a> FAX: +49 (0)7056 9398-29
<b>United Kingdom:</b> <u>ISO 9002 Certified</u>	One Omega Drive, River Bend Technology Centre Northbank, Irlam, Manchester M44 5BD United Kingdom Tel: +44 (0)161 777 6611 Toll Free in United Kingdom: 0800-488-488 e-mail: <a href="mailto:sales@omega.co.uk">sales@omega.co.uk</a> FAX: +44 (0)161 777 6622

It is the policy of OMEGA to comply with all worldwide safety and EMC/EMI regulations that apply. OMEGA is constantly pursuing certification of its products to the European New Approach Directives. OMEGA will add the CE mark to every appropriate device upon certification.

This information contained in this document is believed to be correct, but OMEGA Engineering, Inc. accepts no liability for any error it contains, and reserves the right to alter specifications without notice.  
**WARNING:** These products are not designed for use in, and should not be used for, patient-connected applications.

## Anexo 15: Fichas de seguridad

	FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	Página : 1
		Edición revisada no : 2
		Fecha : 1 / 10 / 2007
		Reemplaza : 29 / 6 / 2004
HIDRÓGENO		067A-1



Pictograma 2.1 : Gas inflamable.



Pictograma 2.2 : Extremadamente inflamable.

### 1 IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O PREPARADO Y DE LA SOCIEDAD O EMPRESA

Nombre comercial : HIDRÓGENO  
 Número de la Ficha de Datos de Seguridad del producto : 067A-1  
 Uso : Varios.  
 Fórmula química : H<sub>2</sub>  
 Identificación de la Compañía : AL AIR LIQUIDE ESPAÑA S.A.  
 Pº DE LA CASTELLANA, 35  
 28046 MADRID ( ESPAÑA )  
 E-mail: e-business.ALE@airliquide.com  
 Número de teléfono de emergencia : 915029300

### 2 IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

Identificación de riesgos : Gas comprimido.  
 Extremadamente inflamable.  
 Primeras vías de exposición : En condiciones normales ninguno.

### 3 COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

Sustancia / Mezcla : Sustancia.  

Nombre del componente	Contenido	Nº CAS	Nº EC	Nº Index	Clasificación
Hidrógeno	100 %	1333-74-0	215-905-7	001-001-00-9	F+; R12


 No contiene otros componentes o impurezas que puedan influir en la clasificación del producto.

### 4 PRIMEROS AUXILIOS

**Primeros auxilios**  
 - Inhalación : A elevadas concentraciones puede causar asfixia. Los síntomas pueden incluir la pérdida de la consciencia o de la movilidad. La víctima puede no haberse dado cuenta de la asfixia.  
 Retirar a la víctima a un área no contaminada llevando colocado el equipo de respiración autónoma. Mantener a la víctima caliente y en reposo. Llamar al doctor. Aplicar la respiración artificial si se para la respiración.  
 - Contacto con la piel y con los ojos : Lavar inmediatamente los ojos con agua durante, al menos, 15 minutos.  
 - Ingestión : La ingestión no está considerada como una vía potencial de exposición.

AL AIR LIQUIDE ESPAÑA S.A.  
 Pº DE LA CASTELLANA, 35 28046 MADRID ( ESPAÑA )  
 E-mail: e-business.ALE@airliquide.com



	FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	Página : 2
		Edición revisada no : 2
		Fecha : 1 / 10 / 2007
		Reemplaza : 29 / 6 / 2004
HIDRÓGENO		067A-1

#### 5 MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

<b>Tipo de inflamabilidad</b>	: Extremadamente inflamable.
<b>Riesgos específicos</b>	: Los ingredientes potencialmente combustibles pueden incendiarse, provocando la propagación del fuego e incrementando el riesgo de quemaduras/lesiones. El fuego puede iniciarse a cierta distancia de la fuga. La exposición al fuego puede causar la rotura o explosión de los recipientes.
<b>Productos peligrosos de la combustión</b>	: Ninguno.
<b>Medios para extinguir incendios</b>	
- Medios de extinción adecuados	: Se pueden utilizar todos los extintores conocidos.
<b>Métodos específicos</b>	: Si es posible detener la fuga de producto. Colocarse lejos del recipiente y enfriarlo con agua desde un recinto protegido. No extinguir una fuga de gas inflamada si no es absolutamente necesario. Se puede producir la reignición espontánea explosiva. Extinguir los otros fuegos.
<b>Equipo de protección especial para la actuación en incendios</b>	: En espacios confinados utilizar equipos de respiración autónoma de presión positiva.


#### 6 MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

<b>Precauciones personales</b>	: Utilizar equipos de respiración autónoma cuando entren en el área a menos que esté probado que la atmósfera es segura. Evacuar el área. Asegurar la adecuada ventilación de aire. Eliminar las fuentes de ignición. Téngase en cuenta el riesgo de atmósferas explosivas.
<b>Precauciones para la protección del medio ambiente</b>	: Intentar parar el escape/derrame.
<b>Métodos de limpieza</b>	: Ventilar la zona.

#### 7 MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

<b>Almacenamiento</b>	: Manténgase en un lugar seco, fresco y bien ventilado. Mantener el contenedor por debajo de 50°C, en un lugar bien ventilado. Separar de los gases oxidantes o de otros materiales oxidantes durante el almacenamiento.
<b>Manipulación</b>	: Asegúrese que el equipo está adecuadamente conectado a tierra. Debe prevenirse la filtración de agua al interior del recipiente. Purgar el aire del sistema antes de introducir el gas. No permitir el retroceso hacia el interior del recipiente. Utilizar solo equipo específicamente apropiado para este producto y para su presión y temperatura de suministro, en caso de duda contacte con su suministrador. Mantener lejos de fuentes de ignición, incluyendo descarga estática. Solicitar del suministrador las instrucciones de manipulación de los contenedores.

AL AIR LIQUIDE ESPAÑA S.A.  
Pº DE LA CASTELLANA, 35 28046 MADRID (ESPAÑA)  
E-mail: e-business.ALE@airliquide.com

	FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	Página : 3
		Edición revisada no : 2
		Fecha : 1 / 10 / 2007
		Reemplaza : 29 / 6 / 2004
HIDRÓGENO		067A-1

#### 8 CONTROLES DE LA EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

- Protección personal : Asegurar una ventilación adecuada.  
No fumar cuando se manipule el producto.
- Protección de las vías respiratorias : En caso de ventilación insuficiente, úsese equipo respiratorio adecuado.
- Protección de las manos : Usen guantes.
- Protección para la piel : No se precisa una protección especial cuando se mantiene la ventilación adecuada.
- Protección para los ojos : Gafas químicas o pantalla de mano con gafas de seguridad.

#### 9 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

- Estado físico a 20°C : Gas comprimido.
- Color : Incoloro.
- Olor : Ninguno.
- Masa molecular : 2
- Punto de fusión [°C] : -259
- Punto de ebullición [°C] : -253
- Temperatura crítica [°C] : -240
- Presión de vapor, 20°C : Inaplicable.
- Densidad relativa del gas (aire=1) : 0,07
- Densidad relativa del líquido (agua=1) : 0,07
- (Condiciones normales T°:15°C ; 1 atm)
- Solubilidad en agua [mg/l] : 1,6
- Rango de inflamabilidad [% de volumen: 4 a 75 en aire]
- Temperatura de auto-inflamación [°C] : 560
- Otros datos : Se quema con una llama invisible e incolora.


#### 10 ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

- Estabilidad y reactividad : Puede formar mezclas explosivas con el aire.  
Puede reaccionar violentamente con materias oxidantes.
- Productos de descomposición peligrosos : No conocido.
- Materiales a evitar : Manténgalo lejos de las fuentes de ignición. Agentes oxidantes.
- Condiciones a evitar : Chispas, Fuego no controlado. Fuentes de calor. Protéjase de fuentes de ignición. No fumar. Tome precauciones especiales para evitar las cargas de electricidad estática.

#### 11 INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

- Información sobre Toxicidad : No se conocen los efectos toxicológicos de este producto.
- Dermal : No hay efecto conocido debido a una exposición crónica a este producto en condiciones normales de uso.
- Ocular : No hay efecto conocido debido a una exposición crónica a este producto en

AL AIR LIQUIDE ESPAÑA S.A.  
Pº DE LA CASTELLANA, 35 28046 MADRID (ESPAÑA)  
E-mail: e-business.ALE@airliquide.com

	FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	Página : 4
		Edición revisada no : 2
		Fecha : 1 / 10 / 2007
		Reemplaza : 29 / 6 / 2004
HIDRÓGENO		067A-1

#### 11 INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA /...

- Ingestión	condiciones normales de uso. : No hay efecto conocido debido a una exposición crónica a este producto en condiciones normales de uso.
-------------	--

#### 12 INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Información sobre efectos ecológicos : No se conocen daños ecológicos causados por este producto.

#### 13 CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN

General	: No descargar en áreas donde hay riesgo de que se forme una mezcla explosiva con el aire. El gas residual debe ser quemado a través de un quemador adecuado que disponga de antirretroceso de llama. No descargar dentro de ningún lugar donde su acumulación pudiera ser peligrosa. Contactar con el suministrador si se necesita orientación.
---------	--


#### 14 INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

No UN	: 1049
H.I. nº	: 23
ADR/RID	
- Nombre propio para el transporte	: UN1049 HIDRÓGENO COMPRIMIDO (Hidrógeno), 2.1, 1F
- ADR Clase	: 2
- Código de clasificación ADR/RID	: 1 F
- Grupo de embalaje ADR	: F
- Etiquetado según ADR	: 2.1
Otras informaciones para el transporte	: Evitar el transporte en los vehículos donde el espacio de la carga no esté separado del compartimento del conductor. Asegurar que el conductor está enterado de los riesgos potenciales de la carga y que conoce que hacer en caso de un accidente o de una emergencia. Antes de transportar las botellas : - Asegurarse de que los recipientes están bien sujetos. - Asegurarse que las válvulas de las botellas están cerradas y no fugan. - Asegurarse que el tapón del acoplamiento de la válvula (cuando exista) está adecuadamente apretado. - Asegurarse que la caperuza de la válvula o la tulpas, (cuando exista), está adecuadamente apretada. - Asegurar una ventilación adecuada. - Asegurarse de cumplir con la legislación aplicable.

#### 15 INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

Clasificación CE	: N° Índice : 001-001-00-9 F+; R12
Etiquetado CE	

AL AIR LIQUIDE ESPAÑA S.A.  
Pº DE LA CASTELLANA, 35 28046 MADRID (ESPAÑA)  
E-mail: e-business.ALE@airliquide.com

	FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	Página : 5
		Edición revisada no : 2
		Fecha : 1 / 10 / 2007
		Reemplaza : 29 / 6 / 2004
HIDRÓGENO		067A-1

#### 15 INFORMACIÓN REGLAMENTARIA /...

- Símbolo(s) : F+ : Extremadamente inflamable
- Frase(s) R : R12 : Extremadamente inflamable.
- Frase(s) S : S9 : Consérvese el recipiente en lugar bien ventilado.  
S16 : Conservar alejado de toda llama o fuente de chispas - No fumar.  
S33 : Evítase la acumulación de cargas electrostáticas.

#### 16 OTRA INFORMACIÓN

Asegúrese que se cumplen las normativas nacionales y locales.  
Asegurarse que los operarios conocen el riesgo de inflamabilidad.  
El riesgo de asfixia es a menudo despreciado y debe ser recalorado durante la formación de los operarios.  
Lista de frases R pertinentes (epígrafe : R12 : Extremadamente inflamable.  
2)  
La presente Ficha de Datos de Seguridad está establecida de acuerdo con las Directivas Europeas en vigor y se aplica a todos los países que han transpuesto las Directivas en su derecho nacional.  
Antes de utilizar el producto en un nuevo proceso o experimento, debe llevarse a cabo un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales.  
Los detalles dados son ciertos y correctos en el momento de llevarse este documento a impresión. A pesar de que durante la preparación de este documento se ha tomado especial cuidado, no se acepta ninguna responsabilidad por las lesiones o los daños resultantes.



Fin del documento



AL AIR LIQUIDE ESPAÑA S.A.  
Pº DE LA CASTELLANA, 35 28048 MADRID (ESPAÑA)  
E-mail: e-business.ALE@airliquide.com

## Fichas Internacionales de Seguridad Química

## METANOL


ICSC: 0057



**METANOL**  
 Alcohol metílico  
 Carbinol  
 Monohidroximetano  
CH3OH  
 Masa molecular: 32,0

Nº CAS 67-56-1  
 Nº RTECS PC1400000  
 Nº ICSC 0057  
 Nº NU 1230  
 Nº CE 603-001-00-X



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	Altamente inflamable. Arde con una llama invisible. Explosivo.	Evitar las flamas. NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con oxidantes.	Polvo, espuma resistente al alcohol, agua en grandes cantidades, dióxido de carbono.
<b>EXPLOSION</b>	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones (véanse Notas).	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rodeando con agua.
<b>EXPOSICION</b>		EVITAR LA EXPOSICION DE ADOLESCENTES Y NIÑOS!	
• <b>INHALACION</b>	Tos, vértigo, dolor de cabeza, náuseas.	Ventilación. Extracción localizada o protección respiratoria.	Air limpio, reposo y proporcionar asistencia médica.
• <b>PIEL</b>	PUEDEN ABSORBERSE! Piel seca, enrojecimiento.	Gaules protectores y traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas, lavar la piel con agua abundante o ducharse y proporcionar asistencia médica.
• <b>OJOS</b>	Enrojecimiento, dolor.	Gafas ajustadas de seguridad o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
• <b>INGESTION</b>	Dolor abdominal, jadeo, pérdida del conocimiento, vómitos (para mayor información véase Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Provocar el vómito (ÚNICAMENTE EN PERSONAS CONSCIENTES!) y proporcionar asistencia médica.

DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
Evacuar la zona de peligro. Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes herméticos, eliminar el líquido derramado con agua abundante y el vapor con agua pulverizada. (Protección personal adicional: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración).	A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. Mantener en lugar fresco.	No transportar con alimentos y piensos. símbolo F símbolo T R: 11-23/24/25-30-23/24/25 S: (1)-7-16-36/37-45 Clasificación de Peligros NU: 3 Riesgos Subsidiarios NU: 6.1 Grupo de Envasado NU: II CE:

**VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE**

ICSC: 0057

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el ICPS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, ICPS, 1994

## Fichas Internacionales de Seguridad Química

## METANOL

ICSC: 0057

D A T O S F I S I C A M P O R T A N T E S	<b>ESTADO FÍSICO; ASPECTO</b> Líquido incoloro, de olor característico.	<b>VÍAS DE EXPOSICIÓN</b> La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.
	<b>PELIGROS FÍSICOS</b> El vapor se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas.	<b>RIESGO DE INHALACIÓN</b> Por evaporación de esta sustancia a 20 °C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.
	<b>PELIGROS QUÍMICOS</b> La sustancia se descompone al calentarse intensamente, produciendo monóxido de carbono y formaldehído. Reacciona violentamente con oxidantes, originando peligro de incendio y explosión. Ataca al plomo y al aluminio.	<b>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN CORTA</b> La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central, dando lugar a una pérdida del conocimiento. La exposición por ingestión puede producir ceguera y sordera. Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata. Se recomienda vigilancia médica.
	<b>LÍMITES DE EXPOSICIÓN</b> TLV (como TWA): 200 ppm; 262 mg/m <sup>3</sup> (piel) (ACGIH 1993-1994). TLV (como STEL): 250 ppm; 328 mg/m <sup>3</sup> (piel) (ACGIH 1993-1994).	<b>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA</b> El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central, dando lugar a dolores de cabeza persistentes y alteraciones de la visión.
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>	Punto de ebullición: 65°C Punto de fusión: -94°C Densidad relativa (agua = 1): 0.79 Solubilidad en agua: Miscible Presión de vapor, kPa a 20°C: 12.3 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.1	Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20 °C (aire = 1): 1.01 Punto de inflamación (c.c.): 12°C Temperatura de autoignición: 365°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 6-35.6 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0.82/-0.66
<b>DATOS AMBIENTALES</b>	 La sustancia presenta una baja toxicidad para los organismos acuáticos y terrestres.	
<b>NOTAS</b>		
EXPLOSION/PREVENCIÓN: Utilícese herramientas manuales no generadoras de chispas. Está indicado un examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-36 Código NFPA: H 1; F 3; R 0;		
<b>INFORMACIÓN ADICIONAL</b>		
FISO: 3-138 METANOL		
ICSC: 0057		<b>METANOL</b>
© CCE, IPCS, 1994		
<b>NOTA LEGAL IMPORTANTE:</b>	Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 6.6.95).	

Adherencia






© INSH



## Fichas Internacionales de Seguridad Química


### FORMALDEHIDO

ICSC: 0

**MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES ESPAÑA**

Metanol  
Metil aldehído  
Oximetileno (botella)  
 $H_2CO$   
Masa molecular: 30.0



**INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO**

Nº CAS 50-00-0  
Nº RTECS LP8925000  
Nº ICSC 0275

TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con polvo y dióxido de carbono.
<b>EXPLOSION</b>	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua.
<b>EXPOSICION</b>		¡EVITAR TODO CONTACTO!	¡CONSULTAR AL MEDICO EN TODOS LOS CASOS!
• INHALACION	Sensación de quemazón. Tos. Dolor de cabeza. Náuseas. Jadeo.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Posición de semincorporado. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica.
• PIEL		Guantes aislantes del frío.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante o ducharse. Proporcionar asistencia médica.
• OJOS	Enrojecimiento. Dolor. Visión borrosa.	Gafas ajustadas de seguridad, o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad); después proporcionar asistencia médica.
• INGESTION		No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	
<b>DERRAMES Y FUGAS</b>		<b>ALMACENAMIENTO</b>	<b>ENVASADO Y ETIQUETADO</b>

Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. Eliminar todas las fuentes de ignición. NO verterlo al alcantarillado. Eliminar gas con agua pulverizada. (Protección personal adicional: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración).	A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco.	NU (transporte): No clasificado. CE: Símbolo: T R: 23/24/25-34-40-43 S: 1/2-26-36/37/39-45-51
VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE		
ICSC: 0275		



## Fichas Internacionales de Seguridad Química

### FORMALDEHIDO

ICSC: 0275

D A T O S F I S I C A L I Z A D O S	<b>ESTADO FÍSICO; ASPECTO</b> Gas de olor característico.	<b>VÍAS DE EXPOSICIÓN</b> La sustancia se puede absorber por inhalación.
	<b>PELIGROS FÍSICOS</b> El gas se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas.	<b>RIESGO DE INHALACIÓN</b> Al producirse una pérdida de gas se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.
	<b>PELIGROS QUÍMICOS</b> La sustancia polimeriza debido al calentamiento suave. Reacciona con oxidantes.	<b>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN</b> La sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La inhalación del puede originar edema pulmonar. (Véanse Notas).
	<b>LÍMITES DE EXPOSICIÓN</b> TLV: 0.3 ppm; (como STEL); A2; SEN (ACGIH 2003) MAK: 0.3 ppm; 0.37 mg/m <sup>3</sup> ; I2; S8 (sensibilización cutánea); Cancerígeno: categoría 4; Riesgo para el embarazo: grupo C; Mutágeno: categoría 5 (DFG 2003)	<b>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA</b> Esta sustancia es posiblemente carcinógena para los seres humanos.
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>	Punto de ebullición: -20°C Punto de fusión: -92°C Densidad relativa (agua = 1): 0.8 Solubilidad en agua: muy elevada	Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.08 Punto de inflamación: gas inflamable Temperatura de autoignición: 430°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 7-73
<b>DATOS AMBIENTALES</b>		
<b>NOTAS</b>		
Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son, por ello, imprescindibles. Debe considerarse la inmediata administración de un aerosol adecuado por un médico o persona por él autorizada.		
<b>INFORMACIÓN ADICIONAL</b>		
Los valores LEP pueden consultarse en línea en la siguiente dirección: <a href="http://www.mtas.es/inch/practico/vias.htm">http://www.mtas.es/inch/practico/vias.htm</a>		Última revisión ICPS: 2000 Traducción al español y actualización de valores límite y etiquetado: 2003 FISQ: 6-105

ICSC: 0275	© CE, IPCS, 2003	FORMALDEHIDO
<b>NOTA LEGAL IMPORTANTE:</b>	Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.	





Reviewed on 04/20/2005

## 1 Identification of substance

- Trade name: **FORMALDEHYDE CATALYST**
- Application of the substance / the preparation Catalysts
- Manufacturer/Supplier:  
Perstorp Specialty Chemicals AB  
SE-284 80 Perstorp, Sweden  
Tel. +46 435 38000  
Fax +46 435 37067  
  
polyinfo@perstorp.com  
www.perstorp.com
- Information department: EHS-department Perstorp Specialty Chemicals AB
- Emergency Information:  
(United States) - CHEMTREC 1-800-424-9300.  
(Int.) +46 8 337043 (Emergency Response Center, Sweden)

## 2 Composition/Data on components

- Dangerous components:

13769-81-8	Ferric molybdate	65-80%
1313-27-5	molybdenum trioxide	20-35%

## 3 Hazards identification

- Information pertaining to particular dangers for man and environment:  
Irritating to eyes and respiratory system.  
Harmful: danger of serious damage to health by prolonged exposure through inhalation and if swallowed.
- Classification system:  
The classification was made according to the latest editions of International substances lists, and expanded upon from company and literature data.
- NFPA ratings (scale 0 - 4)



Health = 2  
Fire = 0  
Reactivity = 0

- HMIS-ratings (scale 0 - 4)



Health = 2  
Fire = 0  
Reactivity = 0

## 4 First aid measures

- After inhalation: Supply fresh air; consult doctor in case of complaints.
- After skin contact: Immediately wash with water and soap and rinse thoroughly.
- After eye contact: Rinse opened eye for several minutes under running water.
- After swallowing:  
Rinse out mouth and then drink plenty of water or milk.  
If symptoms persist consult doctor.

USA  
(Contd. on page 2)

Material Safety Data Sheet  
acc. to ISO/DIS 11014

Page 2/5

04/20/2006

Reviewed on 04/20/2006

Trade name: FORMALDEHYDE CATALYST

(Contd. of page 1)

### 5 Fire fighting measures

- Suitable extinguishing agents: CO<sub>2</sub>, extinguishing powder or water spray. Fight larger fires with water spray or alcohol resistant foam.
- Protective equipment: Mouth respiratory protective device.

### 6 Accidental release measures

- Person-related safety precautions: Ensure adequate ventilation. Avoid formation of dust.
- Measures for cleaning/collecting: Pick up mechanically.

### 7 Handling and storage

- Information for safe handling: Ensure good ventilation/exhaustion at the workplace.
- Information about protection against explosions and fires: Protect against electrostatic charges.
- Storage: Requirements to be met by storerooms and receptacles: Store in a cool location.

### 8 Exposure controls and personal protection

- Additional information about design of technical systems: No further data; see item 7.

- Components with limit values that require monitoring at the workplace:

1313-27-5 molybdenum trioxide

TLV 10 mg/m<sup>3</sup>

as Mo

- Additional information: The lists that were valid during the creation were used as basis.
- Personal protective equipment:
- General protective and hygienic measures: The usual precautionary measures for handling chemicals should be followed.
- Breathing equipment: Use suitable respiratory protective device in case of insufficient ventilation.
- Protection of hands:



Protective gloves

- Material of gloves: Plastic gloves, Strong gloves.
- Penetration time of glove material: The exact break through time has to be found out by the manufacturer of the protective gloves and has to be observed.
- Eye protection:



Safety glasses

(Contd. on page 3)

Page 3/5

**Material Safety Data Sheet**  
 acc. to ISO/DIS 11014

04/20/2006
Reviewed on 04/20/2006

Trade name: **FORMALDEHYDE CATALYST**

(Contd. of page 2)

**9 Physical and chemical properties**

- General information
- Form: Pellets
- Color: Light green
- Odor: Odorless
- Change in condition
- Melting point/Melting range: > 600°C (> 1112°F)
- Boiling point/Boiling range: Undetermined.
- Flash point: Not applicable.
- Flammability (solid, gaseous): Product is not flammable.
- Danger of explosion: Product does not present an explosion hazard.
- Density at 20°C (68°F): 650-900 kg/m³
- Solubility in / Miscibility with
- Water at 20°C (68°F): 0.2 % w/w
- Alcohols: 0.33 % w/w ethanol (25 °C)
- 0.08 % w/w n-butanol (25 °C)
- pH-value (60 g/l) at 20°C (68°F): 4-7
- Segregation coefficient (n-octanol/water): -1.7 log POW (calc. dap)

**10 Stability and reactivity**

- Thermal decomposition / conditions to be avoided:
- No decomposition if used according to specifications.

**11 Toxicological information**

- Acute toxicity:
- LD/LC50 values that are relevant for classification:
- 13769-81-8 Ferric molybdate
- Oral LD50 > 2000 mg/kg (mouse)
- 1313-27-5 molybdenum trioxide
- Oral LD50 3260 mg/kg (rat)
- Dermal LD50 > 2000 mg/kg (rat)
- Inhalative LC50 > 5.84 mg/l (rat)
- Primary irritant effect:
- on the skin: No irritant effect.
- on the eye: Irritating effect.
- Sensitization: No sensitizing effects known.
- Additional toxicological information:
- When used and handled according to specifications, the product does not have any harmful effects according to our experience and the information provided to us.

**12 Ecological information**

- Information about elimination (persistence and degradability):
- Other information: Not available.

(Contd. on page 4)

- USA

Page 4/5

**Material Safety Data Sheet**  
 acc. to ISO/DIS 11014

04/20/2006
Reviewed on 04/20/2006

Trade name: **FORMALDEHYDE CATALYST**

(Contd. of page 3)

- Ecotoxicological effects:
- Aquatic toxicity:

1313-27-5 molybdenum trioxide	
EC50	820 mg/l (bacteria)
EC50/48 h	150 mg/l (daphnia)
EC50/72 h	>100 mg/l (alga)
LC50/96 h	130 mg/l (fish)

**13 Disposal considerations**

- Recommendation: Disposal must be made according to official regulations.

**14 Transport information**

- DOT regulations:
- Hazard class: -
- Land transport ADR/RID (cross-border):
- ADR/RID class: -
- Maritime transport IMDG:
- IMDG Class: -
- Air transport ICAO-TI and IATA-DGR:
- ICAO/IATA Class: -
- Transport/Additional Information: Not dangerous according to the above specifications.

**15 Regulations**

- SARA
- Section 355 (extremely hazardous substances):
- None of the ingredients is listed.
- Section 313 (Specific toxic chemical listings):
- 1313-27-5 | molybdenum trioxide
- TSCA (Toxic Substances Control Act):
- 1313-27-5 | molybdenum trioxide
- Proposition 65
- Chemicals known to cause cancer:
- None of the ingredients is listed.
- Chemicals known to cause reproductive toxicity for females:
- None of the ingredients is listed.
- Chemicals known to cause reproductive toxicity for males:
- None of the ingredients is listed.
- Chemicals known to cause developmental toxicity:
- None of the ingredients is listed.
- Carcinogenicity categories
- EPA (Environmental Protection Agency)
- None of the ingredients is listed.

(Contd. on page 5)

Page 5/5

**Material Safety Data Sheet**  
 acc. to ISO/DIS 11014

04/20/2006
Reviewed on 04/20/2006

Trade name: <b>FORMALDEHYDE CATALYST</b>
--

(Contd. of page 4)

- IARC (International Agency for Research on Cancer)
None of the ingredients is listed.
- NTP (National Toxicology Program)
None of the ingredients is listed.
- TLV (Threshold Limit Value established by ACGIH)
None of the ingredients is listed.
- MAK (German Maximum Workplace Concentration)
None of the ingredients is listed.
- NIOSH-Ca (National Institute for Occupational Safety and Health)
None of the ingredients is listed.
- OSHA-Ca (Occupational Safety & Health Administration)
None of the ingredients is listed.

- Product related hazard Informations:  
Observe the general safety regulations when handling chemicals.

16 Other information

Molybdenum trioxide (CAS 1313-27-5) is currently a subject for reclassification within the EU. This information is based on our present knowledge. However, this shall not constitute a guarantee for any specific product features and shall not establish a legally valid contractual relationship.

- Department issuing MSDS: EHSQ-department, Perstorp Specialty Chemicals AB.

USA



## C. PLANOS

ÍNDICE

1. Intercambiador de calor IC-01 .....3

2. Intercambiador de calor IC-02 .....4

3. Reactor R-01 .....5

4. Intercambiador de calor IC-03 .....6

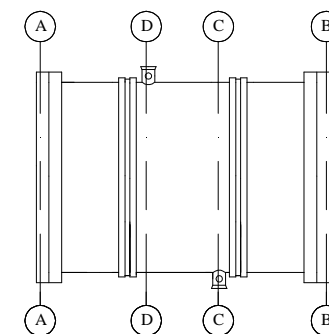
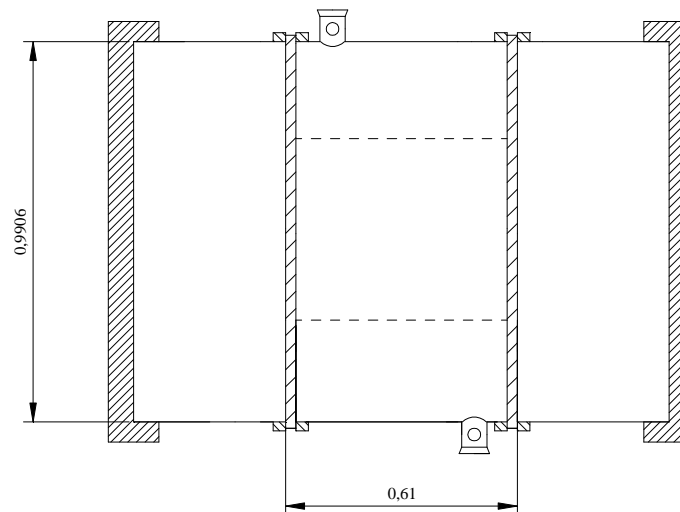
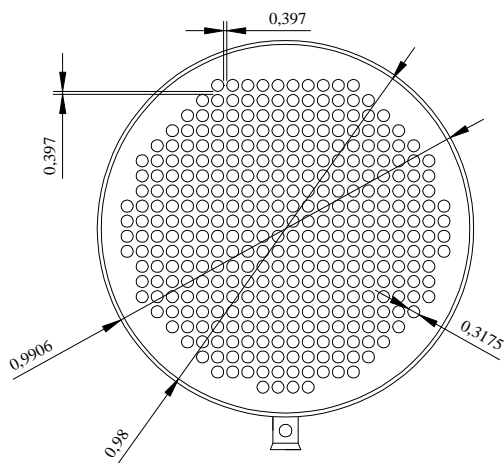
5. Absorbedor A-01.....7

6. Intercambiador de calor IC-04 .....8

7. Mezclador M-01.....9

8. Depósitos de almacenamiento ..... 10





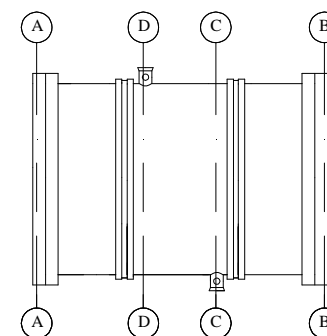
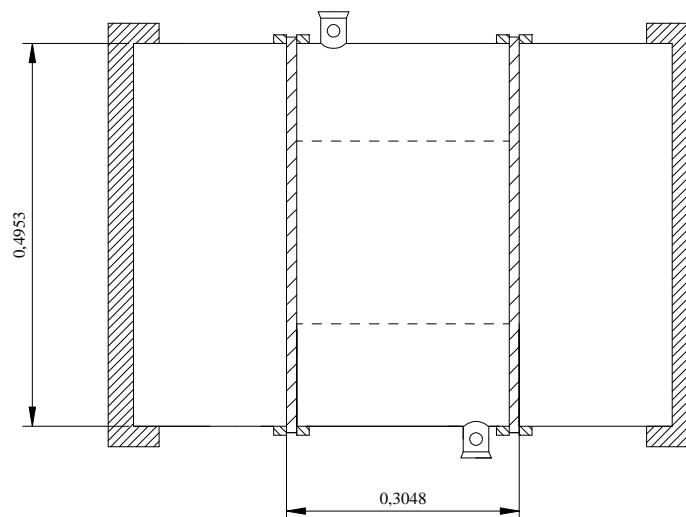
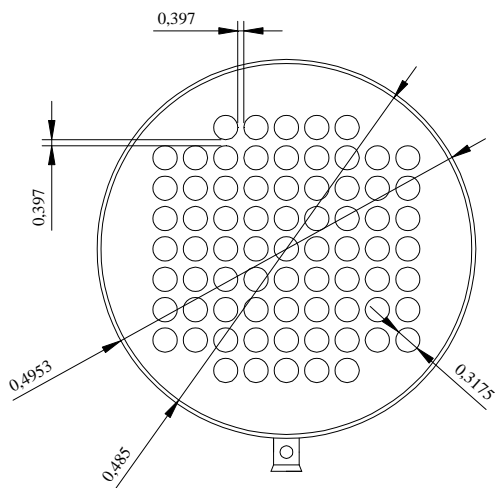
Vista exterior  
Escala 1:40

Características de los tubos	
Número	352
Diámetro exterior	0,03175m
Diámetro interior	0,0269m
Pitch	0,0397m
Disposición	Cuadrada
Longitud	0,61m
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
Número de pasos	1

Características de la carcasa	
Material	Acero SA-240
Diámetro exterior	0,9906m
Espesor	0,00508m
Número de pasos	1

Corrientes		
A	Corriente entrada caliente	570 K
B	Corriente salida caliente	350 K
C	Corriente entrada fría	298 K
D	Corriente salida fría	544,07 K

Titulación:	Nombre:	Fecha:	Firma:	
INGENIERÍA QUÍMICA	Intercambiador de calor IC-01	Junio 2010		
Escala:  1:20	Proyecto:  Parte 1: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol		N° Plano: 01	
			Autor:  Miguel Tinoco Rivas	



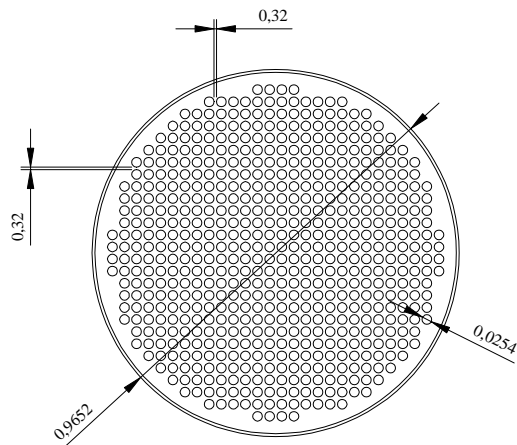
Vista exterior  
Escala 1:20

Características de los tubos	
Número	73
Diámetro exterior	0,03175m
Diámetro interior	0,0269m
Pitch	0,0397m
Disposición	Cuadrada
Longitud	0,3048m
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
Número de pasos	1

Características de la carcasa	
Material	Acero SA-240
Diámetro exterior	0,4953m
Espesor	0,00508m
Número de pasos	1

Corrientes		
A	Corriente entrada caliente	610 K
B	Corriente salida caliente	580 K
C	Corriente entrada fría	544,07 K
D	Corriente salida fría	570 K

Titulación:	Nombre:	Fecha:	Firma:
INGENIERÍA QUÍMICA	Intercambiador de calor IC-02	Junio 2010	
Escala:	Proyecto:		Nº Plano: 02
1:10	Parte 1: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol		Autor: Miguel Tinoco Rivas



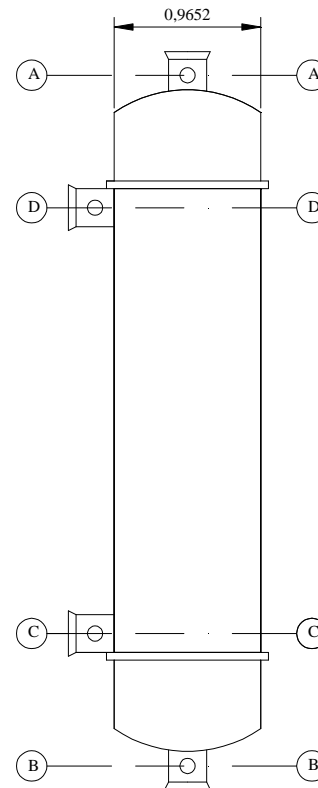
Sección transversal

Escala 1:20

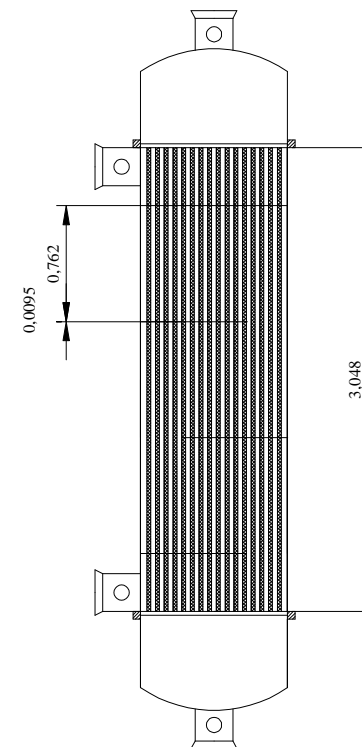
Características de los tubos	
Número	600
Diámetro exterior	0,0254m
Diámetro interior	0,02057m
Pitch	0,03175m
Distribución	Cuadrada
Longitud	3,048m
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6

Características de la carcasa	
Material	Acero SA-240
Diámetro exterior	0,9652m
Espesor	0,00762m

Características de las defelctoras	
Número	4
Material	Acero SA-240
Espesor	0,0095m
Espaciamento	0,762m

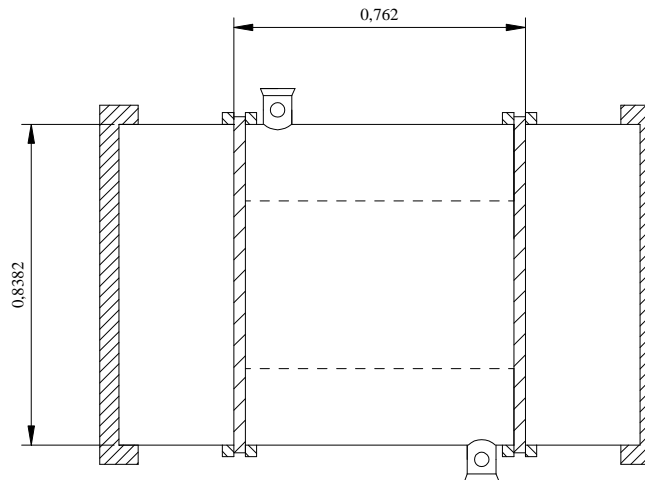
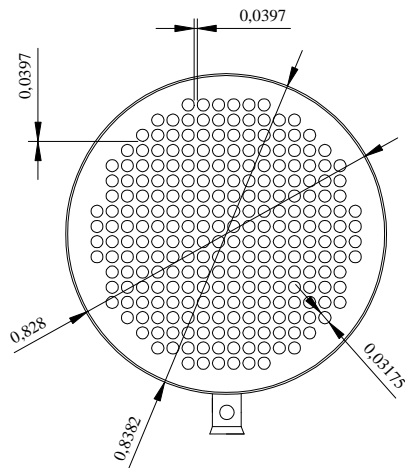


Corrientes	
A	Corriente entrada reactor
B	Corriente salida reactor
C	Corriente entrada refrigeración
D	Corriente salida refrigeración



Características del catalizador	
Sustancia	Molibdato de hierro (III)
Masa	500 kg
Porosidad	0,4

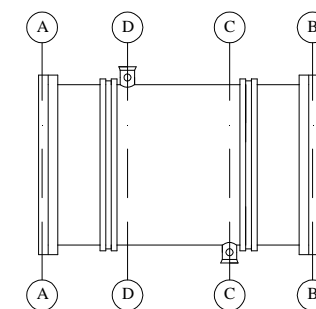
Titulación:	Nombre:	Fecha:	Firma:	
INGENIERÍA QUÍMICA	Reactor R-01	Junio 2010		
Escala: 1:50	Proyecto:			Nº Plano: 03
	Parte 1: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol			Autor: Miguel Tinoco Rivas



Características de los tubos	
Número	252
Diámetro exterior	0,03175m
Diámetro interior	0,0269m
Pitch	0,0397m
Disposición	Cuadrada
Longitud	0,762m
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
Número de pasos	1

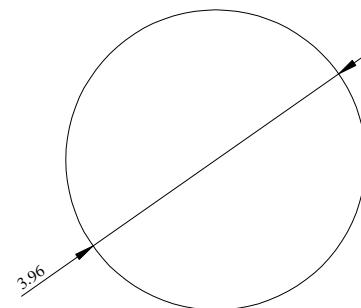
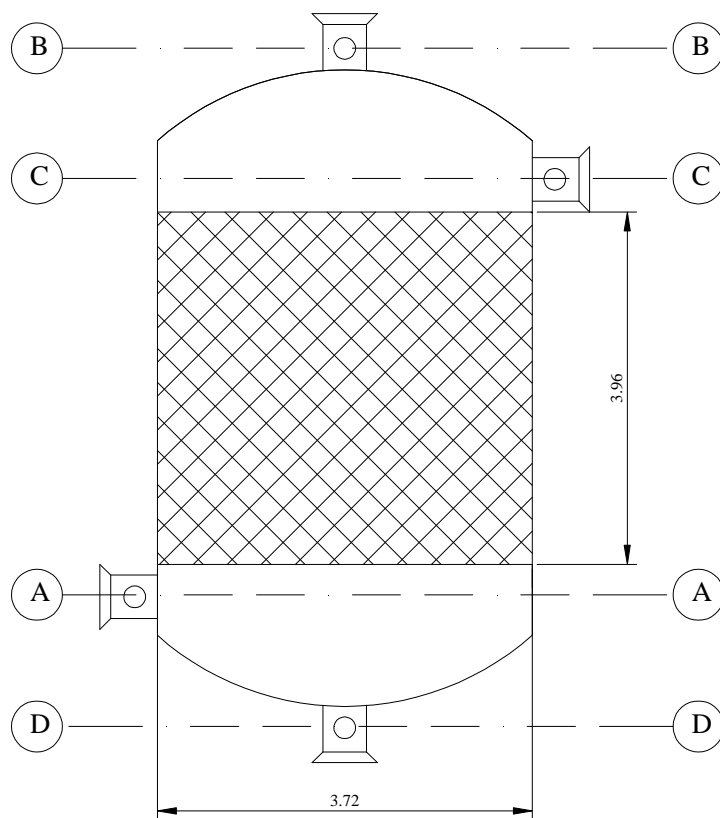
Características de la carcasa	
Material	Acero SA-240
Diámetro exterior	0,8382m
Espesor	0,00508m
Número de pasos	1

Corrientes		
A	Corriente entrada caliente	350 K
B	Corriente salida caliente	310 K
C	Corriente entrada fría	298 K
D	Corriente salida fría	349 K



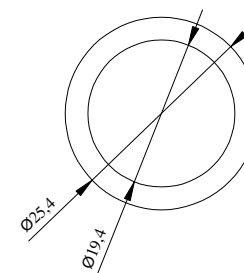
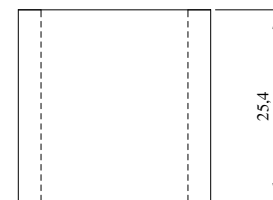
Vista exterior  
Escala 1:40

Titulación:	Nombre:	Fecha:	Firma:
INGENIERÍA QUÍMICA	Intercambiador de calor IC-03	Junio 2010	
Escala: 1:20	Proyecto: Parte 1: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol		Nº Plano: 04
			Autor: Miguel Tinoco Rivas



Sección Horizontal

Escala 1:100



Relleno: Anillos Raschig  
de 1 pulgada

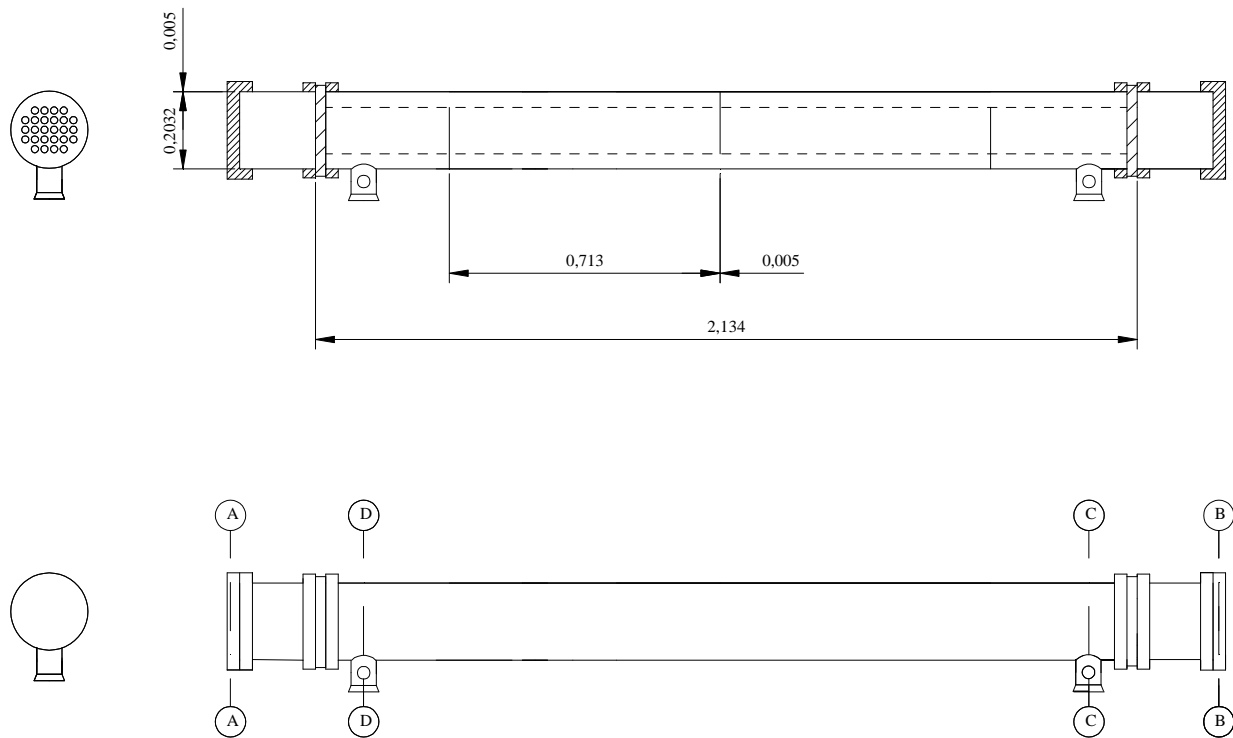
Escala 1:1

Características de la columna	
Diámetro interior	3.96m
Espesor	0,00381m
Altura	3.72m
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6

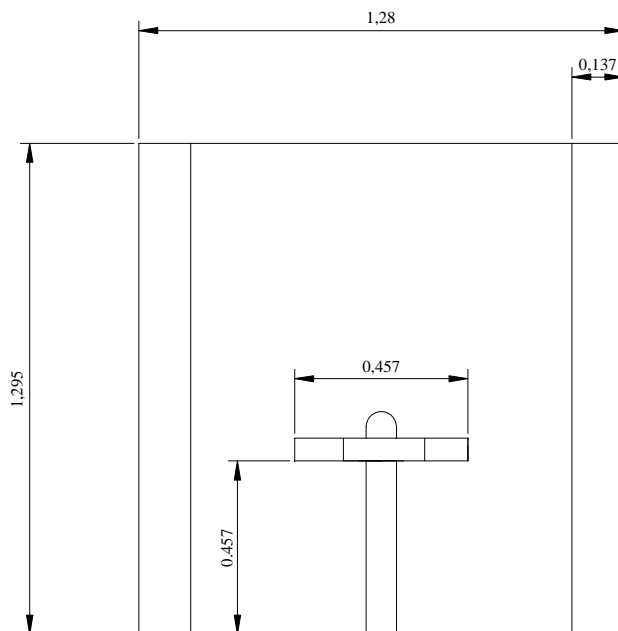
Características del relleno	
Tipo	Anillos Raschig
Dimensión normalizada	0,0254m
Porosidad	0,73
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6

Corrientes	
A	Corriente entrada gaseosa
B	Corriente salida gaseosa
C	Corriente entrada líquida
D	Corriente salida líquida

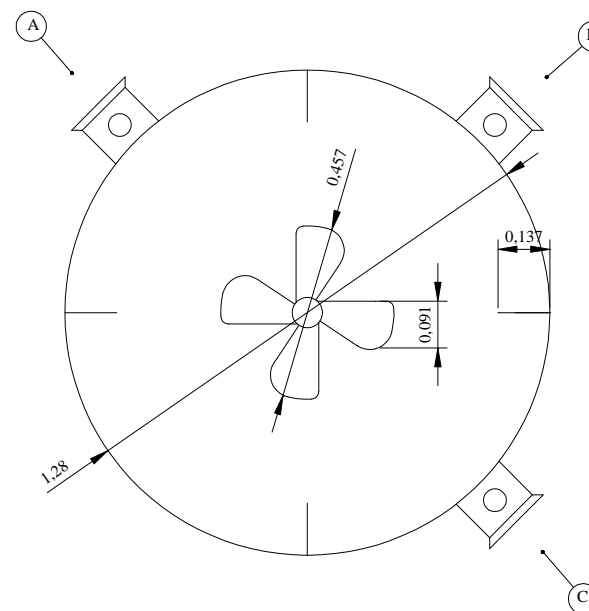
Titulación:	Nombre:	Fecha:	Firma:
INGENIERÍA QUÍMICA	Absorbedor A-01	Junio 2010	
Escala:	Proyecto:		N° Plano: 05
1:80	Parte 1: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol		Autor: Miguel Tinoco Rivas



Titulación:	Nombre:	Fecha:	Firma:
INGENIERÍA QUÍMICA	Intercambiador de calor IC-04	Junio 2010	
Escala:	Proyecto:	Nº Plano:	06
1:20	Parte 1: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol	Autor:	Miguel Tinoco Rivas



Alzado

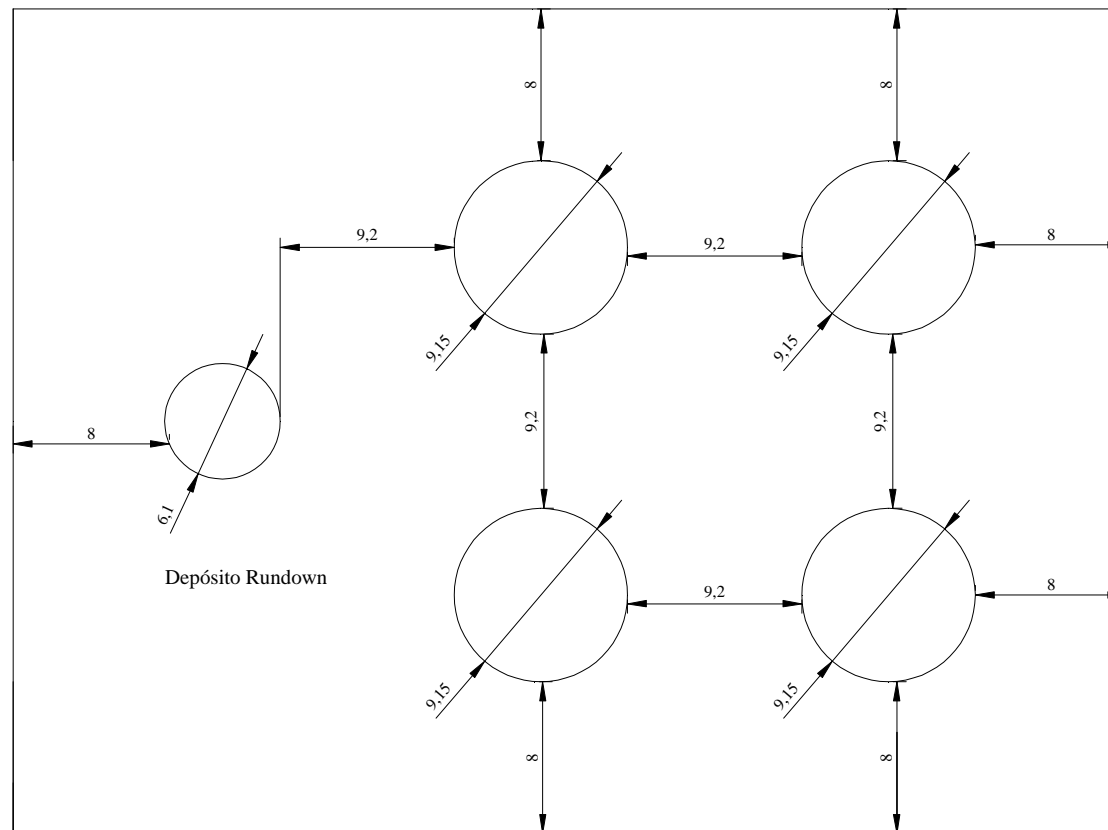


Planta

Volumen total	1,667 m <sup>3</sup>
Volumen útil	1,504 m <sup>3</sup>
Diámetro interior	1,280m
Altura	1,295m
Espesor carcasa	0,00381m
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
Potencia turbina	1491 W
Diámetro turbina	0,457m
Altura turbina	0,457m
Espesor deflectoras	0,137m

Corrientes	
A	Corriente entrada formaldehido
B	Corriente entrada agua
C	Corriente salida producto

Titulación:	Nombre:	Fecha:	Firma:
INGENIERÍA QUÍMICA	Mezclador M-01	Junio 2010	
Escala:  1:20	Proyecto:		Nº Plano: 07
	Parte 1: Diseño del proceso de obtención de formaldehido a partir de metanol		Autor: Miguel Tinoco Rivas



Depósitos de almacenamiento	
Volumen total	520,416m <sup>3</sup>
Volumen útil	252,591m <sup>3</sup>
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
Altura	7,920m
Diámetro interior	9,144m
Espesor	0,00635m

Depósito Rundown	
Volumen total	160,128m <sup>3</sup>
Volumen útil	144,338m <sup>3</sup>
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
Altura	5,490m
Diámetro interior	6,096m
Espesor	0,00508m

Cubeto de retención	
Longitud	58,78 m
Anchura	43,49 m
Altura	0,75m

Titulación:	Nombre:	Fecha:	Firma:
INGENIERÍA QUÍMICA	Depósitos de almacenamiento	Junio 2010	
Escala:	Proyecto:		Nº Plano: 08
1:400	Parte 1: Diseño del proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol		Autor: Miguel Tinoco Rivas



## **D. PLIEGO DE CONDICIONES**

## ÍNDICE

<b>1. Descripción del proceso .....</b>	<b>5</b>
1.1.Objeto del Pliego de condiciones.....	5
1.2.Objeto del Proyecto .....	5
1.3. Emplazamiento.....	5
1.4. Documentos del Proyecto que definen las obras .....	5
1.5. Normas, reglamentos y ordenanzas para los materiales y obras .....	6
1.1.1. Normas de edificación .....	7
1.1.2. Normas UNE.....	7
1.1.3. Normas ISO.....	7
<b>2. Condiciones generales.....</b>	<b>8</b>
2.1. Condiciones generales facultativas .....	8
2.1.1. Disposiciones generales .....	8
2.1.2. Términos del Pliego de condiciones.....	8
2.1.3. Interpretación técnica.....	8
2.1.4. Obligaciones y derechos del Contratista.....	9
2.1.5. Facultades en la dirección de obra .....	11
2.1.6. Libro de órdenes .....	12
2.1.7. Replanteo .....	13
2.1.7.1. Acta de comprobación de Replanteo.....	13
2.1.7.2. Modificaciones acordadas debidas a la comprobación del Replanteo....	13
2.1.8. Ejecución de las obras.....	14
2.1.9. Condiciones generales del suministro de equipos.....	14
2.1.10. Contradicciones entre Pliegos y Normas .....	15
2.1.11. Significados de los ensayos .....	15
2.1.12. Puesta a punto y pruebas de funcionamiento .....	16
2.1.13. Control de calidad y ensayo .....	16
2.1.14. Partidas de alzada .....	16
2.1.15. Recepción provisional de las obras.....	17
2.1.16. Periodo de garantías .....	18
2.1.17. Recepción definitiva.....	18

2.1.18. Documento final de la obra .....	19
2.2. Condiciones generales económicas .....	19
2.2.1. Finanzas.....	20
2.2.2. Composición de precios unitarios y precios contradictorios .....	20
2.2.3. Mejoras y modificaciones .....	21
2.2.4. Revisiones de precios.....	22
2.2.5. Valoración, medición y abonos de los trabajos .....	23
2.2.6. Penalizaciones.....	23
2.2.7. Seguros y conservación de la obra.....	23
2.2.8. Condiciones de pago .....	24
2.3. Condiciones generales legales.....	25
2.3.1. Disposiciones legales.....	25
2.3.2. Contratista .....	25
2.3.3. Contrato .....	26
2.3.4. Adjudicación.....	26
2.3.5. Arbitrajes y jurisdicción competente .....	27
2.3.6. Responsabilidades del Contratista.....	28
2.3.7. Subcontratas .....	29
2.3.8. Accidentes de trabajo .....	30
2.3.9. Rescisión de contrato.....	31
<b>3. Condiciones particulares .....</b>	<b>34</b>
3.1. Disposiciones de carácter particular .....	34
3.2. Condiciones de materiales, equipos y maquinaria .....	34
3.2.1. Materiales de construcción.....	34
3.2.2. Materiales para la fabricación de equipos.....	35
3.2.3. Equipos.....	38
3.2.4. Maquinaria .....	39
3.3. Condiciones de ejecución.....	39
3.3.1. Movimientos de tierras y obras de saneamiento .....	39
3.3.2. Cimentaciones.....	39
3.3.3. Estructuras metálicas .....	39
3.3.4. Albañilería, cerrajería, carpintería y fontanería.....	40
3.3.5. Cubiertas de edificios.....	40
3.3.6. Instalaciones eléctricas, calefacción y ventilación.....	40

3.3.7. Instalaciones de protección contra incendios.....	40
3.3.8. Pinturas y vidrieras.....	40
3.3.9. Otras instalaciones no específicas .....	40
<b>4. Condiciones particulares de los equipos .....</b>	<b>41</b>
4.1. Especificaciones del intercambiador de calor IC-01.....	41
4.2. Especificaciones del intercambiador de calor IC-02.....	42
4.3. Especificaciones del reactor R-01.....	43
4.4. Especificaciones del intercambiador de calor IC-03.....	44
4.5. Especificaciones de la columna de absorción A-01.....	44
4.6. Especificaciones del intercambiador de calor IC-04.....	45
4.7. Especificaciones del mezclador M-01 .....	46
4.8. Especificaciones del depósito “Rundown” .....	46
4.9. Especificaciones de los depósitos de almacenamiento .....	47
4.10. Especificaciones de los equipos de impulsión de fluidos.....	47
4.11. Especificaciones de las conducciones .....	48
4.12. Especificaciones de los accesorios de las conducciones .....	48
4.13. Especificaciones de las válvulas.....	49
4.14. Especificaciones de los equipos de control.....	49

## **CAPÍTULO 1: Descripción del proceso**

### **1.1. Objeto del Pliego de condiciones**

El presente Pliego de Condiciones constituye un conjunto de instrucciones para el desarrollo del presente Proyecto Fin de Carrera, conteniendo las características técnicas que deben reunir los materiales, las condiciones técnicas a observar en la ejecución de las distintas unidades de obra, el modo de medir y valorar, constituyendo un documento contractual, siéndole aplicable el texto Refundido de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 2/2000 de 16 de Junio y las demás normas que lo desarrollen y lo complementen, sin oponerse al mismo, y en concreto, lo dispuesto en el Reglamento General de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas, aprobado por el Real Decreto 1098/2001, de 12 de Octubre y el Pliego de Cláusulas Administrativas Generales.

### **1.2. Objeto del Proyecto**

El objeto del presente Proyecto Fin de Carrera es el diseño de una línea de proceso de producción de formaldehído a partir de metanol. Dicha línea de proceso se encuentra englobada en una planta química, donde, a partir de gas natural se obtiene el metanol, y a partir de éste el producto principal que es el formaldehído, siendo este último proceso el diseñado en el presente Proyecto Fin de Carrera

La producción de la línea de proceso es de 22.000 T<sub>m</sub>/año de formaldehído con una pureza del 37%. Quedan fuera del alcance del proyecto el diseño de las líneas eléctricas y las líneas de suministro de los servicios auxiliares (agua, vapor de alta) requeridas por el propio sistema.

### **1.3. Emplazamiento**

La planta se encuentra a menos de 5 km al norte de la Refinería CEPSA Gibraltar-San Roque, a menos de 3 km de una carretera principal, en las cercanías de un gaseoducto y a más de 2,5 km de cualquier núcleo de población. La planta estará al norte de dicha región, además de por las anteriores razones logísticas y de seguridad, para situarse más próxima a las industrias del corcho. Sólo problemas derivados que en la realización la hicieran inviable, sería motivo de cambio, para lo cual se debe consultar a la Propiedad y dicho cambio debe ir avalado por la Dirección Técnica.

### **1.4. Documentos del Proyecto que definen las obras**

Los documentos que definen las obras y que la propiedad entrega al contratista pueden tener carácter contractual o meramente informativo. Entendiendo por documentos contractuales aquellos que estén incorporados en el contrato y que sean de obligado cumplimiento, excepto modificaciones debidamente autorizadas.

El presente Proyecto consta de los siguientes documentos:

- A. Título.
- B. Memoria.
  - B.1. Memoria Descriptiva.
  - B.2. Anexos a la Memoria.
- C. Planos.
- D. Pliego de Condiciones.
- E. Presupuesto.

Son documentos contractuales los Planos, el Pliego de Condiciones y el Presupuesto recogidos en el presente proyecto, mientras que los datos incluidos en la Memoria y Anexos tienen carácter meramente informativo.

### **1.5. Normas, reglamentos y ordenanzas para los materiales y obras**

El Pliego de Condiciones prevalecerá sobre el contenido de las siguientes disposiciones. Las disposiciones de carácter particular de ámbito técnico son:

- Real Decreto 919/2006, 28 de Julio, por el que se aprueba el Reglamento Técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias IDG 01 A 11.
- Ley 6/ 2001, 8 de Mayo, de modificación del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de Junio, de Evaluación del Impacto Ambiental.
- Orden FOM/891/2004, de 1 de Marzo, por la que se actualizan determinados artículos de Pliego de Prescripciones Técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a firmes y pavimentos.
- Orden FOM/475/2002, de 13 de Febrero por la que se actualizan determinados artículos del Pliego de Preinscripciones Técnicas Generales para obra de carreteras y puentes relativos a hormigones y aceros.
- Real Decreto 2267/2004, de 3 de Diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.
- Real Decreto 315/2006, de 17 de Marzo (Ref. 2006/5516), sobre la creación del Consejo sobre la Sostenibilidad, Innovación y Calidad de Edificación.
- Real Decreto 1797/2003, de 26 de Diciembre, por el que se aprueba la instrucción para la recepción de cementos (RC-03).
- Real Decreto, de 10 de Marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.
- Real Decreto 1124/2000, de 16 de Junio, por el que se modifica el Real Decreto 665/1992, de 12 de Mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo (B.O.E. núm. 145 de 17 de Junio de 2000).

- Real Decreto 1299/2006, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro. BOE núm. 302 de 19 de diciembre.

#### **1.5.1. Normas de edificación**

- Normas básicas de edificación (NBE).
- Normas tecnológicas de Edificación (NTE).
- Relativas a cimentaciones.
- Relativas a estructuras de acero (EA).
- Relativas a instalaciones de electricidad de puesta a tierra (JET).
- Relativas a instalaciones de electricidad de red exterior (IR).
- Relativas a instalaciones de electricidad de transformadores (IET).
- Reglamento del agua.
- Relativas a instalaciones de fontanería de abastecimiento (IFA).
- Relativas a instalaciones de salubridad de humos y gases (ISH).
- Relativas a instalaciones de salubridad de depuración y vertidos (ISD).
- Relativas a instalaciones de salubridad de alcantarillado (ISA).
- Instrucciones para la fabricación y suministro de hormigón preparado (EHPRE-72). (OM del 10 de Mayo de 1973)
- Instrucciones EH-91 y EP-80 para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado.
- Reglamento sobre recipientes y aparatos a presión, aprobado por el Decreto 1244/1979 de 4 de abril.
- Pliego de prescripciones técnicas generales para la recepción de cementos (RC- 93).
- Normas I.N.T.A. (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial “Esteban Terradas”) de la comisión 17 sobre pinturas, barnices, etc.
- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión e instrucciones reglamentarias. Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto (BOE núm. 224 del miércoles 18 de Septiembre).
- Reglamento de la Línea Eléctrica de Alta tensión. Decreto 3151/68, de 28 de noviembre.
- Impermeabilización de cubiertas: (NBE MV-301-1970).

#### **1.5.2. Normas UNE**

Normas UNE (Normativa de la Asociación española de Normalización) que pueden afectar a los materiales, equipos y unidades de obra incluidos en el Proyecto.

#### **1.5.3. Normas ISO**

Normas ISO (Organización Internacional de Normalización) que pueden afectar a los materiales, equipos y unidades de obra incluidos en el Proyecto.

## CAPÍTULO 2: Condiciones generales

### 2.1. Condiciones generales facultativas

#### 2.1.1. Disposiciones generales

Se establecen las siguientes disposiciones generales:

- Reglamento de contratación de competencias locales.
- Ley, Reglamento y Pliego de contrataciones del Estado.
- Pliego de Cláusulas económico-administrativas particulares.
- Ley de contrato de trabajo y disposiciones vigentes que regulan las relaciones patrón-obrero.
- Ordenanza Laboral de Seguridad e Higiene en el trabajo, así como cualquier otra que con carácter general se dicte.

En el caso de que exista una contradicción entre estas disposiciones y el presente Pliego, siempre se considerará que prevalece lo contenido en éste.

#### 2.1.2. Términos del Pliego de condiciones

El significado de los términos desarrollados en el presente Pliego es el siguiente:

- **Propiedad:** de la compañía que proyecta la ejecución de esta Planta de procesos, cuya autoridad viene representada por su Director General.
- **Dirección de Obra:** está constituida por el Titulado Superior y Titulado Medio que designa la propiedad en su momento. Su misión es la de representar a la Propiedad, defender sus intereses y establecer las relaciones contractuales con el Contratista adjudicatario de la obra del Proyecto. Tiene como deber encargarse de que la obra sea una reproducción fidedigna de lo proyectado y estipulado en este Pliego, así como con su intervención se garantiza la inspección de materiales, el estado de los equipos, el perfecto funcionamiento y el apoyo técnico al Contratista.
- **Contratista:** Entidad fiscal que contrata con la Propiedad la ejecución material de toda la obra o una parte de ella. Cuando en el Pliego se refiere al Contratista, se refiere al Contratista general de la obra y no a las subcontratas que este haya podido a su vez realizar. No podrá hacer uso de la documentación del Proyecto para cualquier otro fin diferente al desarrollo del mismo.

#### 2.1.3. Interpretación técnica

Corresponde exclusivamente a la Dirección Técnica, la interpretación del Proyecto y la consiguiente expedición de órdenes complementarias, gráficas o escritos para el desarrollo del mismo.



La Dirección Técnica podrá ordenar, antes de la ejecución de las obras, las modificaciones de detalles del Proyecto que crea oportunas siempre que no altere las líneas generales de éste, no excedan la garantía técnica y sean razonablemente aconsejadas por eventualidades surgidas durante la ejecución de los trabajos o por mejoras que crea conveniente introducir. Corresponde también a la Dirección Técnica apreciar las circunstancias en las que, a instancias del Contratista, pueda proponerse la sustitución de materiales de difícil adquisición por otros de características similares, aunque de distinta calidad o naturaleza y fijar la alteración de precios que en tal caso sea razonable.

Las condiciones técnicas presentes en este Pliego de Condiciones obligan del mismo modo a las obras que se realizan por contrata y a las que pudieran decidir la Propiedad durante el régimen de administración.

El Contratista no podrá alterar ninguna parte del Proyecto, ni hacer uso de los Planos y datos para distintos fines de los de esta obra.

#### **2.1.4. Obligaciones y derechos del Contratista**

Se considera que el contratista es la parte contratante obligada a ejecutar la obra. En el caso de que dos o más empresas presenten una oferta conjunta a la licitación de una obra, quedarán obligadas solidariamente frente a la Administración y deberán cumplir lo dispuesto en los artículos 24 de la Ley de contratos de las Administraciones Públicas y 24 del Reglamento General de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas.

La Propiedad entregará al Contratista, libre de todo gasto, tres copias de todos los planos necesarios para la ejecución del trabajo. En el caso de que el Contratista necesitara más copias, la Propiedad se las entregará cargándole su coste.

El Contratista ha de comprobar el lugar de construcción y, si hubiera lugar, los planos, especificaciones y listas antes de presentar su oferta, y que ha quedado conforme con las condiciones en que habrá que ejecutarse el trabajo, inclusive en lo referente al alcance, índole o naturaleza del mismo, posibles obstrucciones y cualquier otra condición de una u otra forma pueda influir en el mismo.

El contratista está obligado al cumplimiento de las disposiciones vigentes en materia laboral, de seguridad social y de seguridad e higiene en el trabajo.

El Contratista deberá conocer las disposiciones laborales, o de otra índole vigente, que pueden ser de aplicación en la realización del trabajo; la disponibilidad de mano de obra local, la disponibilidad de materiales, las condiciones locales de transporte y alojamiento del personal. No se admitirá ninguna reclamación del mismo, cuyo origen este ocasionado por no haber hecho anteriormente dicha comprobación. El Contratista proporcionará un número suficiente de operarios competentes y el personal supervisor y administrativo necesario a fin de cumplir con el programa de construcción.

Durante todo el periodo de ejecución del trabajo, el Contratista destacará en la obra un jefe de obra competente y tantos ayudantes como sean necesarios para controlar o supervisar a todo su personal y administrar adecuadamente el contrato.

El jefe de obra representará al Contratista y todas las instrucciones relativas a la realización del trabajo dadas a aquel por escrito obligarán al Contratista tanto como si se hubiesen dado a él directamente. El Contratista no podrá cambiar su jefe de obra si no es bajo previa autorización por escrito de la Propiedad.

El jefe de obra será plenamente responsable de la dirección y organización del trabajo, del manejo y control del personal del Contratista empleado para la ejecución de la obra, debiendo conocer detalladamente las condiciones y términos del contrato.

El jefe de obra cuidará de que su personal circule por la línea de proceso, si esto fuese necesario, según itinerarios marcados por la Propiedad, no pudiendo seguir otros caminos, ni entrar en unidades ajenas al trabajo, estén operativas o no.

Además, el Contratista debe cumplir todas las reglamentaciones y órdenes, aplicables a las prácticas de salarios y empleos y en proceder de acuerdo con la política de la Propiedad en los asuntos que afecten a las prácticas locales.

El Contratista proporcionará, en todo momento en el sitio de la obra durante la construcción, servicios apropiados de reconocimiento y primeros auxilios. Se tomarán las precauciones necesarias para una rápida asistencia médica en el lugar más cercano que proporcione dichos servicios. El incumplimiento, por parte de un empleado de la empresa Contratista, de las reglas y prácticas requeridas por la Propiedad será causa suficientemente justificada para su despido.

Los empleados del Contratista deben estar sujetos a identificación y provistos de los documentos aceptados por la Propiedad para este efecto. El Contratista mantendrá en el sitio de la obra un expediente individual de cada persona que regularmente se emplee en la construcción de la obra. Todos los empleados que visiten la planta deben seguir las instrucciones relativas a seguridad e identificación, tal como si estuvieran regularmente empleados en el sitio de la obra. Cualquiera de los oficiales de seguridad puede, en cualquier momento, solicitar la identificación apropiada y/o el de empleo de cualquier persona.

La propiedad notificará al Contratista la reglamentación que afecte a visitas, accesos, entrada de automóviles en el recinto de la obra, pases especiales y zonas prohibidas de la línea de proceso.

El contratista deberá constituir el órgano necesario con función específica de velar por el cumplimiento de las disposiciones vigentes sobre seguridad e higiene en el trabajo y designará el personal técnico de seguridad que asuma las obligaciones correspondientes en cada centro de trabajo.

El incumplimiento de estas obligaciones por parte del contratista, o la infracción de las disposiciones sobre seguridad por parte del personal técnico designado por él, no implicarán responsabilidad alguna para la Administración contratante.

#### **2.1.5. Facultades en la dirección de obra**

El Director de la obra es la persona, con titulación adecuada y suficiente, directamente responsable de la comprobación y vigilancia de la correcta realización de la obra contratada.

Para llevar a cabo el desempeño de su función podrá contar con colaboradores a sus órdenes, que desarrollarán su labor en función de las atribuciones derivadas de sus títulos profesionales o de sus conocimientos específicos y que integrarán la “Dirección de la obra”.

El director designado será comunicado al contratista por la Administración antes de la fecha de comprobación del replanteo, y procederá de igual forma respecto a su personal colaborador. Las variaciones de uno y otro que acaezcan durante la ejecución de la obra serán puestas en conocimiento del contratista por escrito.

Entre las funciones del director de obra se pueden nombrar las siguientes:

- Realizar la comprobación del replanteo.
- Informar el programa presentado por el contratista.
- Garantizar la ejecución de las Obras con estricta sujeción al proyecto presentado, o modificaciones debidamente autorizadas, y al cumplimiento de trabajo.
- Definir aquellas condiciones técnicas que los Pliegos de condiciones técnicas dejan a decisión.
- Exigir al contratista, directamente o a través del personal a sus órdenes, el cumplimiento de las condiciones contractuales.
- Resolver todas las cuestiones técnicas que surjan en cuanto a interpretación de planos, condiciones de materiales y de ejecución de unidades de obras, siempre que no se modifiquen las condiciones del contrato.
- Estudiar las incidencias o problemas planteados en las obras que impidan el normal cumplimiento del contrato o aconsejen su modificación, tramitando, en su caso, las propuestas correspondientes.
- Asumir personalmente y bajo su responsabilidad, en casos de emergencia o gravedad, la dirección inmediata de determinadas operaciones o trabajos en curso; para lo cual el contratista deberá poner a su disposición el personal y material de la obra.
- Acreditar al contratista las obras ejecutadas, conforme a lo dispuesto en los documentos del contrato.
- Participar en las recepciones de las obras y redactar la liquidación de las mismas conforme a las normas legales establecidas.
- Proponer las actuaciones procedentes para obtener de los organismos oficiales y de los particulares, los permisos y autorizaciones necesarias para la ejecución de las obras

y ocupación de los bienes ocupados por ella, y resolver los problemas planteados por los servicios y servidumbres relacionados con las mismas.

El objetivo de la Dirección es que la obra se realice según el Proyecto aprobado y con la calidad, Plazo y Presupuesto estipulados.

Por su parte, el contratista estará obligado a cumplir las órdenes de la Dirección y deberá facilitar a ésta toda su labor de vigilancia y control de la Obra.

Los materiales necesarios para la ejecución de las Obras serán suministrados en su totalidad por el Contratista y deberán ser reconocidos antes de su puesta en obra por la Dirección de Obra, sin cuya aprobación no podrán utilizarse en la misma.

El Contratista someterá al examen de la Dirección de Obra, al menos dos muestras del material que se trate, reservándose éste el derecho a desechar aquellos que no reúnan las condiciones que deba reunir el material a utilizar según su propio juicio. Los materiales rechazados serán retirados en el plazo más breve. Las muestras de los materiales que hayan sido aceptados serán conservadas juntamente con los certificados de los análisis y ensayos a efectos de posteriores comparaciones y contrastes.

Si en función del criterio de la Dirección de Obra, alguna unidad de obra estuviera defectuosamente ejecutada, el Contratista estará obligado a demolerla y a ejecutarla nuevamente todas las veces que sean necesarias hasta que merezca la conformidad de la Dirección de Obra. Estos aumentos de trabajo no le concederán derecho a percibir indemnización alguna, y ello aún en el caso que las condiciones de mala ejecución de las obras se hubieren detectado con posterioridad a la recepción provisional. Tampoco el supuesto de mala ejecución podrá repercutir en los plazos parciales o en el total de la ejecución de la obra.

#### **2.1.6. Libro de órdenes**

Con objeto de que en todo momento se pueda tener un conocimiento exacto de la ejecución e incidencias de la obra, existirá en ella, en todo momento mientras dure su ejecución, el libro de órdenes, en el que se reflejarán las visitas realizadas por la Dirección de la Obra, las incidencias surgidas y en general todos aquellos datos que sirvan para determinar con certeza si el Contratista ha cumplido los plazos y fases de ejecución previstas para la realización del proyecto.

Las anotaciones en el libro de órdenes darán fe a efectos de determinar eventuales causas de resolución y demás incidencias del contrato. Cuando el Contratista no estuviese conforme, podrá alegar en su defensa todas aquellas razones y circunstancias que avalen su postura, aportando las pruebas que estime pertinentes.

### **2.1.7. Replanteo**

#### **2.1.7.1. Acta de comprobación de Replanteo**

El Acta de comprobación de Replanteo reflejará la conformidad o disconformidad del mismo respecto de los documentos contractuales del proyecto, con especial y expresa referencia a las características de la obra, a la autorización para la ocupación de los terrenos necesarios y a cualquier punto que pueda afectar al cumplimiento del contrato.

En función de sus resultados, se procederá en los términos del artículo 139 del Reglamento General de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas. En el caso de que el Contratista, sin formular reservas sobre la viabilidad del proyecto, hubiera hecho otras observaciones que puedan afectar a la ejecución de la obra, el Director, consideradas tales observaciones, decidirá iniciar o suspender el comienzo de la obra, justificándolo en la propia acta.

La presencia del Contratista en el propio acto de comprobación del Replanteo podrá suplirse por la de un representante debidamente autorizado, quién así mismo suscribirá el acta correspondiente. Un ejemplar del Acta se remitirá a la Administración, otro se entregará al contratista y un tercero a la dirección.

Serán de cuenta del Contratista los gastos de los materiales, los del propio personal y los de los representantes de la Administración que sean necesarios para realizar la comprobación del Replanteo, debiendo hacer efectivos los últimos en la forma, plazos y cuantías que regulen las disposiciones vigentes y que se señalen en el pliego de cláusulas particulares de la obra de que se trate.

#### **2.1.7.2 Modificaciones acordadas debidas a la comprobación del Replanteo**

Si como consecuencia de la comprobación del Replanteo se deduce la necesidad de introducir en el Proyecto alguna modificación, el Director redactará en el plazo de 15 días, y sin perjuicio de la remisión inmediata del acta, una estimación razonada del importe de aquellas modificaciones.

Si la Administración decide la modificación del Proyecto, se procederá a redactar las modificaciones precisas para su viabilidad, acordando la suspensión temporal, total o parcial de la obra y ordenando en este último caso la iniciación de los trabajos en aquellas partes no afectadas por las modificaciones previstas en el Proyecto. Una vez aprobado el Proyecto modificado, con arreglo a lo dispuesto, será el vigente a los efectos del contrato.

El Contratista facilitará todos los medios precisos para la materialización de los replanteos, que serán a su cargo, asumiendo la responsabilidad del mantenimiento de las señales o datos que se fijan sobre el terreno para su cálculo.

#### **2.1.8. Ejecución de las obras**

El Contratista dará comienzo a las obras dentro de los siete días siguientes a la formalización del contrato, salvo que dicha fecha quedara expresamente determinada en el mismo. La fecha de comienzo así fijada contará a efectos de plazos de ejecución y de revisión de precios en el supuesto de que tal revisión se hubiese pactado.

Acompañando a su oferta económica, el Contratista presentará un calendario de los trabajos a ejecutar en el que se precisará el tiempo necesario para ejecutar la totalidad de la obra y de cada una de sus correspondientes partes.

El plazo en el que el Contratista se compromete a ejecutar las obras objeto de este proyecto quedará fijado en el contrato y su incumplimiento se entenderá como una rescisión unilateral e injustificada del mismo. A efectos del cómputo de ejecución, la Dirección de Obra extenderá en el libro de órdenes diligencia haciendo constar el día en que se inician los trabajos, conforme a lo señalado en el artículo precedente.

Deberían descontarse en dichos plazos los días de parada debidos a fuerza mayor que impidan el normal desarrollo de los trabajos siempre que así lo estime conveniente la Dirección de Obra.

Siempre que cualquier parte de la obra se complete, quedando lista para operar la Propiedad puede tomar posesión de tal servicio para su utilización. Sin embargo, la posesión u operación de cualquier parte determinada de la obra no constituirá necesariamente una aceptación por parte de la Propiedad. El Contratista estará obligado a completar las partes no terminadas de dichos servicios, haciéndose responsable de errores u omisiones descubiertas después de la utilización por parte de la Propiedad, tal como si el citado servicio no hubiese sido puesto en operación.

El Contratista deberá someter a la aprobación de la Dirección Técnica antes del comienzo de las obras un programa con especificaciones de plazos parciales y fechas de terminación de las distintas unidades de obra, compatibles con el plazo total de ejecución. Este plan, una vez aprobado por la Propiedad, se incorporará al Pliego de Condiciones y adquirirá, por tanto, carácter contractual.

La aceptación del plan de obra no implica exención alguna de responsabilidades para el Contratista en caso de incumplimiento de los plazos parciales o totales convenidos.

#### **2.1.9. Condiciones generales del suministro de equipos**

Los equipos se ajustarán a las condiciones especificadas desarrolladas para cada uno de ellos en sus correspondientes Hojas de Especificaciones, siendo los materiales a utilizar en la fabricación del equipo aprobados por la Dirección Técnica. Los diseños de detalle referentes al equipo en el transcurso de la obra, serán desarrollados por el Contratista, y deben ser aprobados por la Dirección técnica previamente al suministro.

Los materiales utilizados en la fabricación del equipo deben estar aprobados y definidos por la Dirección técnica, especialmente aquellos que estén en contacto con el material a inspeccionar.

La adquisición de los equipos deberá ser documentada por el Contratista tras la instalación del equipo y el perfecto funcionamiento de éste. La entrega quedará documentada mediante un informe de recepción firmado por el Contratista y por la Dirección Técnica.

Si durante la instalación o recepción del equipo se define algún detalle sobre las capacidades del equipo que no estaba definida en el Proyecto, deberá ser estudiada por el Contratista y la Dirección Técnica, debiendo introducirse en el Proyecto final las conclusiones de este estudio y los costes originados cubiertos por la Propiedad.

#### **2.1.10. Contradicciones entre Pliegos y Normas**

En casos excepcionales se justifican posibles discrepancias, prevaleciendo lo incluido en el Pliego sobre cualquier otra disposición. A pesar del Pliego de Condiciones haya sido elaborado de acuerdo con las disposiciones oficiales vigentes.

Las omisiones en los planos y el Pliego de Condiciones o las descripciones erróneas de los detalles de la obra que deben ser subsanados, para que pueda llevarse a cabo en espíritu o intención expuesto en los planos y el Pliego de Condiciones o que, por uso y costumbres, deben ser realizados, no solo no exima al Contratista de la obligación de ejecutar estos detalles u obra omitidos erróneamente sino que por el contrario, deberán ser ejecutados como si se hubiera completado y correctamente especificados en los planos y Pliego de Condiciones.

#### **2.1.11. Significado de los ensayos**

Los ensayos durante la ejecución de la obra son meros antecedentes de la recepción. Estos ensayos no liberan al Contratista para subsanar, reponer o reparar los equipos e instalaciones que no pasen el reconocimiento final.

Independientemente de la Dirección Técnica de las obras, la propiedad podrá inspeccionar en cualquier momento la buena marcha de las obras, así como la adecuación de las mismas a las estipulaciones del contrato y adoptar cuantas decisiones considere procedentes en garantía de su correcta ejecución.

El Contratista se ve obligado a facilitar a la Dirección Técnica la labor de realización de ensayos e inspecciones.

Siendo efectuadas dichas pruebas a pleno caudal de la instalación o de la parte de la misma a la que afecte la prueba. De manera que el desarrollo de estas pruebas nos ayudará a comprobar el buen comportamiento de la totalidad de las instalaciones y mecanismos de la instalación.

#### **2.1.12. Control de calidad y ensayo**

Cuando lo estime oportuno la Dirección de Obra ordenará realizar las pruebas y ensayos, análisis y extracción de muestras, que sean necesarias para comprobar que las unidades de obra y sus materiales componentes están en las condiciones exigibles y cumplen con lo establecido en este Pliego. Las pruebas y ensayos se harán bajo su inspección.

El Contratista deberá, por su propia cuenta, suministrar a los laboratorios de control de calidad homologados una cantidad suficiente de material a ensayar, y abonar todos los gastos que estas pruebas generen.

Antes de iniciarse la Obra, el Contratista presentará a la Dirección de Obra un Plan de Autocontrol de Calidad de las diferentes unidades de obras y materiales, para su aprobación. Así mismo el Contratista propondrá tres laboratorios homologados para la realización de dicha campaña, de los cuales la Dirección de Obra podrá, no obstante, designar un laboratorio homologado, si desestima los propuestos.

Habrà que tener en cuenta que ninguna parte de la obra será enterrada de manera que sea inaccesible, sin que previamente haya sido inspeccionada y aceptada por la Propiedad. El Contratista corregirá, a su costa, cualquier obra que a su juicio de la representación de la Propiedad no haya superado la inspección o pruebas.

La Propiedad podrá ordenar la discusión, y en este caso el Contratista estará obligado a dejar al descubierto dicha parte de la obra. Si queda comprobado que tal trabajo está ejecutando de acuerdo con los documentos del contrato, la Propiedad abonará el costo de las inspecciones y el de la restitución de la obra al estado en que se encontraba. Por el contrario, si se comprueba que tal trabajo no se ejecutó de acuerdo con los documentos del contrato, el Contratista pagará tales gastos.

#### **2.1.13. Puesta a punto y pruebas de funcionamiento**

Aquellos elementos de la instalación que, por naturaleza y forma de sus condiciones, no tienen necesidad de poner en servicio al conjunto de la instalación serán objeto de prueba tan pronto como se hayan acabado.

Antes de verificar la recepción provisional, se someterán las obras a pruebas de resistencia, estabilidad e impermeabilidad. De igual modo el Contratista procederá a la puesta a punto de la instalación, verificándose pruebas generales de su funcionamiento y efectividad de tratamiento.

#### **2.1.14. Partidas de alzada**

Aquella partida del presupuesto que el proyectista en su momento no pudo medir o valorar pero que sabía que aparecerían en la ejecución de la obra.



Para la ejecución material de las partidas alzadas deberá obtenerse la previa aprobación de la Dirección de Obra. Antes de proceder a la ejecución, se someterá a su consideración el detalle desglosando del importe de las mismas y si resultase conforme podrán realizarse.

Será de aplicación lo dispuesto en la cláusula 52 del Pliego de Cláusulas Administrativas Generales para la contratación de obras del Estado, aprobado por el Decreto 3854/1970 del 31 de Diciembre.

#### **2.1.15. Recepción provisional de las obras**

Terminado el periodo de la prueba de funcionamiento con resultado satisfactorio se procederá a la recepción provisional de la forma que dispone de la legislación vigente. Para ello deberán haberse cumplido las condiciones siguientes:

- Resultado satisfactorio de las pruebas realizadas.
- Cumplimiento de todas las obligaciones contenidas en el contrato o en acuerdos posteriores.

En el acto de recepción estarán presentes: la persona en quien delegue la Entidad Promotora de las obras, la Dirección de Obra de las mismas y el Contratista, levantándose acta del mismo.

El Acta de Recepción contendrá necesariamente los siguientes documentos:

- Relación de problemas de funcionamiento pendientes de resolver si diera el caso.
- Relación de los puntos que deben ser estudiados o vigilados especialmente durante el periodo de garantía.
- Protocolo de las pruebas de rendimiento y funcionamiento a realizar durante el periodo de garantía.

Si las obras no se hallaran en estado de ser recibidas, se hará constar así en el acta, con medición de las circunstancias o defectos que lo impidan, dándose las instrucciones precisas y detalladas por la Dirección de Obra al Contratista a efectos de subsanar los defectos observados, fijándose plazo para efectuarlo, a cuyo vencimiento se realizará una nueva inspección para la recepción provisional de las obras. Si el Contratista no subsanase los defectos encontrados se producirá la rescisión del contrato, con pérdida de las retenciones practicadas a no ser que la Propiedad juzgue oportuno conceder un nuevo e improrrogable plazo.

El plazo de garantía comenzará a contarse a partir de la fecha de la recepción provisional positiva de la obra.

En la recepción provisional, el Contratista deberá presentar las autorizaciones de los organismos oficiales para el uso y puesta en servicio de las instalaciones que así lo requieran, no se realizará la recepción provisional ni, como es lógico la definitiva, si no se cumple este requisito.

#### **2.1.16. Periodo de garantías**

El plazo de ejecución de la totalidad de las obras de este Proyecto será el que se fije en el Contrato, empezando a contar a partir del día siguiente al levantamiento del Acta de Replanteo. Incluye el montaje de las instalaciones precisas para la elaboración de todos los trabajos. Los plazos parciales ajustados al programa de trabajo tienen también la consideración de oficiales y por tanto obligan contractualmente.

El Contratista garantiza en general todas las obras que ejecute, así como los materiales empleados en ellas y su correcta manipulación.

El plazo de garantía será de un año y durante el mismo el Contratista procederá a la conservación de la obra, con arreglo a lo dispuesto en el Pliego de Condiciones Generales Facultativas y según las instrucciones que reciban de la Dirección de Obra, siempre de forma que tales trabajos no obstaculicen el uso público o servicios correspondientes a la obra. El Contratista responderá de los daños o deterioros que puedan producirse en la obra durante el plazo de garantía, a no ser que pruebe que los mismos han sido ocasionados por el mal uso que de aquella hubiera hecho la entidad encargada de la explotación y no al incumplimiento de sus obligaciones de vigilancia y policía de la obra.

En caso de que el Contratista no cumpliera con esta obligación, las reparaciones serán ejecutadas por la Propiedad con cargo a las retenciones.

Junto con la recepción final de los equipos se entregará una lista de repuestos, precio y lugares de adquisición recomendados de los mismos.

El Contratista podrá contratar con la Propiedad un contrato de mantenimiento preventivo o de asistencia en caso de avería, que cubra el periodo de garantía y el tiempo posterior a éste.

Para poder decidir sobre las cuentas pendientes de resolver o que surjan durante el periodo de garantía o en la ejecución de pruebas, incluyendo naturalmente las reparaciones, modificaciones o sustituciones que se presenten, el Contratista queda obligado a mantener un representante con capacidad y obligación de firmar las actas que se vayan levantando.

El Contratista garantiza a la Propiedad contra toda reclamación de terceras personas que tuvieran su origen en el incumplimiento de sus obligaciones económicas o de las disposiciones legales relacionadas con la obra. Una vez aprobada la recepción y liquidación definitiva, la Propiedad devolverá, en su caso, las cantidades retenidas al Contratista en las certificaciones.

#### **2.1.17. Recepción definitiva**

Dentro del mes siguiente al cumplimiento del plazo de garantía, se procederá a la recepción definitiva de las obras.

Si las obras se encontrasen en las condiciones debidas, se procederá a su recepción definitiva, de la que se levantará acta, en virtud de lo cual el Contratista quedará relevado de toda responsabilidad.

El Acta de Recepción Definitiva de las obras se efectuará después de terminado el periodo de garantía en la forma que dispone la legislación vigente. En dicho acta deberán quedar resueltas todas las cuestiones que en el Acta de Recepción Provisional quedaron pendientes del funcionamiento durante el periodo de garantía.

#### **2.1.18. Documento final de la obra**

El Contratista entregará a la Dirección de Obra, antes de la Recepción definitiva, tres ejemplares del documento elaborado como final de obra. Dicho documento deberá recoger todas las incidencias acaecidas en la obra desde su inicio hasta su finalización, así como aquellas modificaciones que durante el transcurso de la misma hayan tenido lugar. Del mismo modo, quedarán perfectamente reflejadas, mediante la documentación gráfica correspondiente, la ubicación final de todas las instalaciones para que, de este modo se facilite cualquier trabajo de reparación o modificación que resulte necesario llevar a cabo con posterioridad.

#### **2.2. Condiciones generales económicas**

Todas las unidades de obra se medirán y abonarán por su volumen, superficie, longitud y peso. Si el Contratista construye mayor volumen del que corresponde en los dibujos que figuran en los planos o en sus reformas autorizadas, no se abonará este exceso, pero si este resultara perjudicial, a juicio de la Dirección Técnica, se verá obligado a demolerlo de forma gratuita y a rehacerlo con las dimensiones debidas.

Serán de cuenta del Contratista las obras auxiliares que para la realización de los trabajos sean necesarios o que la Dirección de Obra estime imprescindibles, y no tendrá derecho a retribución especial, considerándose incluidos estos gastos en los precios de la obra.

Serán también de cuenta del Contratista los útiles y herramientas necesarios para la ejecución de las obras, y los medios auxiliares reunirán las condiciones de seguridad indispensables para el personal, siendo el Contratista directamente el responsable de los accidentes o desperfectos que se pudiera ocasionar.

Las mejoras de obra que voluntariamente efectúe el Contratista en atención a una calidad superior a la exigida en el Proyecto, o cualquier modificación que el mismo introdujera sin la conformidad de la Dirección de Obra por escrito, no serán abonadas. En ningún caso el Contratista tendrá derecho a reclamación por motivos de insuficiencia de precio o falta de explicación.

### **2.2.1. Finanzas**

El Contratista prestará fianza que se corresponderá con un depósito previo, en metálico o valores, o aval bancario, por importe del 5% del precio total de contrata.

La fianza retenida será devuelta al Contratista en un plazo que no excederá de treinta días, una vez firmada el Acta de Recepción Definitiva de la obra, siempre y cuando no existan penalizaciones de algún tipo por incumplimiento de algún apartado del contrato, en cuyo caso se descontará de la fianza el valor de los mismos devolviendo el resto al Contratista en ese mismo plazo. La Propiedad podrá exigir que el Contratista le acredite la liquidación y finiquito de sus deudas causadas por la ejecución de la obra, tales como salarios, suministros, subcontratos, etc.

Cuando no haya peligro de que los materiales recibidos como útiles y almacenados en la obra o en los almacenes autorizados para su acopio sufran deterioro o desaparezcan, se podrá abonar al contratista hasta el 75% de su valor, teniendo en cuenta ese adelanto para deducirlo más tarde del importe total de las unidades de obra en que queden incluidos tales materiales.

Para realizar dicho abono será necesaria la constitución previa del correspondiente aval, de acuerdo con lo establecido en el Reglamento General de Contratación.

Podrán concederse abonos a cuenta, con las garantías previstas en el artículo 143 del Reglamento General de Contratación, por razón del equipo y de las instalaciones necesarias para la ejecución de la obra, si son propiedad del contratista, se hallan en disposición de ser utilizados y dicha utilización ha de tener lugar en plazo inmediato de acuerdo con el programa de trabajo.

Los abonos a cuenta por instalaciones y equipos serán fijados, discretamente, por el Director con las limitaciones que aparecen en el Pliego de Cláusulas Administrativas Generales para la contratación de obras de Estado.

### **2.2.2. Composición de precios unitarios y precios contradictorios**

Todos los precios unitarios se entienden valorados para cada partida totalmente terminada y, en el caso de equipos y maquinaria funcionando, están comprendidos en ella la parte proporcional de costes de puesta a punto, permisos, boletines, licencias, tasas, suministros para pruebas, etc.

El cálculo de los precios de las distintas unidades de obra es el resultado de sumar las siguientes partidas:

1. Materiales, expresando las cantidades que en cada unidad de obra se precisen de cada uno de ellos y su precio unitario respectivo de origen.
2. Transporte de materiales, desde el punto de origen al pie de la obra, expresando el precio del transporte de unidades.

3. Mano de obra por categorías dentro de cada oficio, expresando el número de horas invertidas por cada operario en la ejecución de cada unidad de obra y los jornales horarios correspondientes.
4. Tanto por ciento de seguros sociales y cargas vigentes sobre el costo de la mano de obra, especificando en documento aparte, la cuantía de cada concepto del seguro o carga.
5. Tanto por ciento de medios auxiliares y de seguridad sobre la suma de conceptos anteriores en las unidades de obra que se precisen.
6. Tanto por ciento de gastos generales, sobre la suma de conceptos anteriores.
7. Así como el tanto por ciento de beneficio industrial del contratista, aplicando a la suma total de los conceptos anteriores.

Se entiende por Precio de Ejecución Material (P.E.M.) al resultado obtenido por la suma de los anteriores conceptos, quedando excluido el beneficio industrial. La suma de todas las cantidades que importan las siete partidas se entiende que es el precio unitario contratado (Precio de Ejecución por Contrata).

Todas las partidas que intervienen en el presupuesto tendrán su precio unitario descompuesto y descrito de forma completa, de modo que queden precisadas y determinadas cualitativa y cuantitativamente todas las características técnicas importantes de cada unidad a ejecutar, y su precio final estará escrito en letras, expresado en euros con dos decimales.

Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar unidades de obra que no figuren en el presupuesto del proyecto base del contrato, la propuesta del Director sobre los nuevos precios a fijar se basará en cuanto resulte de aplicación, en los costes elementales fijados en la descomposición de los precios unitarios integrados en el contrato y, en cualquier caso, en los costes que correspondiesen a la fecha en que tuvo lugar la licitación del mismo.

Los nuevos precios, una vez aprobados por la Administración, se considerarán incorporados a todos los efectos a los cuadros de precios del proyecto que sirvió de base para el contrato, sin perjuicio de lo establecido en el artículo 158 del Reglamento General de la Ley de Contratos de la Administración.

### **2.2.3. Mejoras y modificaciones**

Si se advierten defectos en la construcción o se tienen razones fundadas para creer que existen ocultos en la obra ejecutada, la Dirección ordenará, durante el curso de la ejecución, siempre antes de la recepción definitiva, la demolición y reconstrucción de las unidades de obra en que se den aquellas circunstancias o las acciones precisas para comprobar la existencia de tales defectos ocultos.

Si la dirección ordena la demolición y reconstrucción por advertir vicios o defectos patentes en la construcción, los gastos de esas operaciones serán de cuenta del contratista, con derecho de éste a reclamar ante la Administración conforme en el plazo de diez días, contados a partir de la

notificación escrita de la Dirección. Si no resulta comprobada la existencia real de defectos, los cargos correrán a cargo de la Administración.

Si ante unidades de obras defectuosas y que no cumplen estrictamente las condiciones del contrato, la Dirección las estima sin embargo, admisibles; puede proponer a la Administración contratante la aceptación de las mismas, con la consiguiente rebaja de los precios. El contratista queda obligado a aceptar los precios rebajados por la administración, a no ser que prefiera demoler y reconstruir las unidades defectuosas por su cuenta y con arreglo a las condiciones de contrato.

#### **2.2.4. Revisión de precios**

Para realizar la revisión de precios se usarán los últimos índices oficiales de revisión de precios que hayan sido aprobados por la Comisión Delegada de Asuntos Económicos y que hayan sido publicados en el BOE.

Para poder en un momento dado discernir con la mayor aproximación acerca de las posibles revisiones de precios que puedan presentarse durante la obras como consecuencia de un aumento oficial autorizado, o en el caso de una posible rescisión del contrato, los contratistas de los distintos gremios presentarán juntamente con su presupuesto de unidades de obra otra hoja firmada con los siguientes datos:

- Plazo de ejecución de obra contratada.
- Porcentaje de mano de obra, de materias, de gastos generales y de beneficio industrial que suponen estos conceptos con relación al importe total del presupuesto de contrata de cada gremio.
- Los precios de las distintas unidades y su descomposición con el fin de aclarar más aún cualquier duda que pudiera surgir en el caso de una liquidación parcial de obra o de revisión de precios.

Las propuestas de los distintos gremios se presentarán en sobre cerrado por duplicado a la Dirección de Obra.

Las fórmulas polinómicas con estructuras de costos en la actualidad autorizadas y por consiguiente utilizadas en las revisiones de contratos, son las derivadas del Decreto Ley 2/1964 de 4 de Febrero, por el que se modifica el 16/1963, de 10 de Octubre, sobre inclusión de cláusulas de revisión en los contratos de grados y Organismos Autónomos (BOE 6/2/64).

Las fórmulas actualmente aplicables: de la 1 a la 39 del Decreto 3650/1970 de 19 de Diciembre (B.O.E 29/12/ 70) y de la 40 a la 48 del Real Decreto 2167/1981 de 20 de agosto (B.O.E de 24/9/81).

### **2.2.5. Valoración, medición y abonos de los trabajos**

Las valoraciones de las unidades de obra que figuren en el presente Proyecto se efectuarán multiplicando el número de aquellas por el precio unitario asignado a las mismas en el Presupuesto.

En el precio unitario se consideran incluidos los gastos de transporte de materiales, las indemnizaciones o pagos que hayan de hacerse por cualquier concepto, así como todo tipo de impuestos fiscales que graven los materiales, ya sea de origen estatal, autonómico o municipal, y también las cargas sociales.

Igualmente, serán de cuenta del Contratista los honorarios, las tasas y demás gravámenes que se originen por inspecciones, aprobación y comprobación de las instalaciones con que esté dotado el local.

En el precio de cada unidad de obra están comprendidos los costes de todos los materiales, accesorios y operaciones necesarias para dejar la obra terminada y en disposición de ser recibida.

### **2.2.6. Penalizaciones**

Si finalizado el plazo de ejecución de las obras, éstas no hubieren terminado sin motivo justificado por parte de la contrata, se aplicarán los siguientes recargos a imputar al Contratista desde fecha de finalización de las obras:

- Por día natural de retraso un 0.1% de la fianza, hasta el día 30.
- A partir del día 31 hasta el día 60 la penalización por día natural de retraso será de un 0.5% del valor al que ascienda la fianza.

Pasados estos plazos se rescindirá el contrato quedando obligado el Contratista a responder por daños y perjuicios a esta entidad. De igual manera se actuará en caso de que se dé incumplimiento del contrato por parte del Contratista.

### **2.2.7. Seguros y conservación de la obra**

El Contratista y otros contratistas o subcontratados, empleados en el área de trabajo, procederán en todo momento en función de los mejores intereses de la Propiedad y protegerán en toda su capacidad la propiedad, equipo y herramientas de este último.

El Contratista será responsable del trabajo y acciones de todas las otras firmas contratadas o subcontratadas empleadas por el mismo. Notificará inmediatamente a la Propiedad de cualquier práctica peligrosa por otros contratistas no empleados por ella misma. Será enteramente responsable de los daños que se pudieran ocasionar en personas o cosas, a terceros y/o a la Propiedad, durante la ejecución del trabajo.

En ausencia del representante autorizado de la Propiedad, el Contratista actuará por criterio propio para prevenir o evitar por parte de terceras personas cualquier acción que pudiera resultar en perjuicio de la Propiedad o poner en peligro el personal o la obra.

El Contratista mantendrá en vigor, y a su costa, durante el período de construcción y de pruebas, los siguientes seguros:

- Seguro obligatorio de vehículos a motor, propio o contratados que intervengan en los trabajos de construcción a todo riesgo, con garantía de responsabilidad civil limitada.
- De accidentes de trabajo y demás seguros sociales de su personal, según la legislación vigente.
- De daños que puedan sufrir las obras provisionales realizadas durante el periodo de construcción y de pruebas, incluyéndose la cobertura de riesgos catastróficos.

El Contratista se compromete a mostrar a la Propiedad los seguros que cubren los límites antes citados. Exigirá, en nombre de la Propiedad, que formalicen y mantengan en vigor a su costa durante el periodo de construcción y de prueba los mismos seguros antes mencionados. Mantendrá libre a la Propiedad de todas las reclamaciones por siniestros indemnizables, sobre la base de riesgos cubiertos por los seguros indicados, aunque estos no hubieran sido mantenidos en vigor por el Contratista y/o subcontratados durante el periodo de construcción y de pruebas. Además, el Contratista acreditará el cumplimiento de lo establecido en este punto ante la Propiedad y la Dirección de Obra con antelación al comienzo de las obras.

#### **2.2.8. Condiciones de pago**

Los pagos se harán mensualmente por el 100 % del importe de la certificación aprobada respecto a unidades de obra completadas correspondiente al mes anterior.

Las cantidades retenidas serán reintegradas por la Propiedad al Contratista una vez cumplido el plazo de garantía, siempre que no se haya observado ningún defecto en la ejecución de los trabajos realizados, mala calidad de los materiales utilizados y se haya firmado el acta de recepción definitiva.

Las certificaciones se presentarán mensualmente a la representación de la Propiedad por triplicado y en forma aceptable por la misma. En cada certificación constará por separado el importe de los trabajos realizados. Las certificaciones reflejan el total acumulado del trabajo realizado hasta finales del mes anterior y se presentarán a la representación de la Propiedad en los primeros diez días de cada mes para la comprobación de las mismas.

Al finalizar el trabajo, el Contratista presentará una última certificación con carácter definitivo en la que haga constar que renuncia a toda reclamación por omisión de cantidades de trabajo no certificadas con anterioridad y que todos los precios aplicados a las unidades de trabajo realizadas son conformes.



### **2.3. Condiciones generales legales**

La obra es competencia de la Junta de Andalucía, pero de forma supletoria y ante la ausencia de una norma que recoja el Pliego de Condiciones Legales para la contratación de obras de la Junta de Andalucía, a la obra le es de aplicación el Pliego de Condiciones Legales para la Contratación de obras del Estado aprobado por el Decreto 3854/1970.

#### **2.3.1. Disposiciones legales**

Se disponen de las siguientes:

- Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo y Plan Nacional de Higiene y Seguridad del Trabajo (O.M. 9-III-71).
- Comité de Seguridad e Higiene en el Trabajo (Decreto 432/71 11-III-71).
- Reglamento de Seguridad e Higiene en la Industrias de la Construcción (O.M. 20-V- 52).
- Reglamento de los Servicios Médicos de Empresa (O.M. 21-IX-59).
- Ordenanza de Trabajo de Construcción, Vidrio y Cerámica (O.M. 28-VIII-70).
- Reglamento Electrotécnico de Líneas Baja Tensión (O.M. 20-IX-73).
- Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión (O.M. 28-XI-68).
- Obligatoriedad de la Inclusión de un Estudio de Seguridad e Higiene en el Trabajo de los Proyectos de Edificación (R.D. 555/1986, 21-II-86).
- Las normas que estén en vigor en el momento.
- Convenio Colectivo Provincial del Sector de la Construcción y Estatuto de los Trabajadores.

También es de cumplimiento obligado cuanto la Dirección de Obra dicte encaminado a garantizar la seguridad de los obreros y de la obra en general.

#### **2.3.2. Contratista**

El Contratista deberá acreditar su capacidad técnica para la realización de la obra ante la Propiedad mediante la siguiente información:

##### **1. Lista de obras realizadas:**

- Lista de obras construidas durante los últimos cinco años, en las que la empresa haya sido Contratista único o miembro de un consorcio con intervención significativa en el mismo, indicando ubicación, costo y tipo de contrato, plazo contractual, tiempo de ejecución real, etc.
- Información documentada sobre la ejecución en los últimos cinco años, de obras similares en características y magnitud, si las hubiera, en las cuales haya sido Contratista único o miembro de un consorcio donde haya ejercido participación principal. En cada caso se mencionará el plazo contractual y si se ha cumplido con el mismo, debidamente certificado.

2. Lista de equipamiento y maquinarias: a afectar a estas obras, con indicación de sus características, estado de conservación, tiempo de uso y de vida útil.
3. Personal a emplear:
  - Nómina.
  - Currículo.
  - Calificación del personal directivo y de conducción de la empresa.

Esta documentación debe ser de conformidad de la Propiedad y constituirá una razón para la denegación de la obra.

### **2.3.3. Contrato**

El contrato de obras del Estado se registrará peculiarmente por la Ley y Reglamento General de Contratos del Estado, por las prescripciones del correspondiente pliego de cláusulas administrativas particulares y, en lo que no resulte válidamente modificado por éste, por el presente Pliego.

El desconocimiento del contrato en cualquiera de sus términos, de los documentos anejos que forman parte del mismo o de las instrucciones, pliegos o normas de toda índole promulgados por la Administración que puedan tener aplicación a la ejecución de lo pactado no examinará al contratista de la obligación de su cumplimiento. El contrato se firmará dentro de los diez días de notificada la adjudicación.

A partir de la firma del contrato, la Propiedad podrá extender la Orden de Inicio de Obra correspondiente. Firmado el contrato, el Contratista no podrá transferirlo ni cederlo, en todo o en parte, a otra persona o entidad, ni asociarse para su cumplimiento sin autorización previa y por escrito de la Propiedad.

En el caso de que el Contratista no disponga del equipamiento propio necesario para realizar los servicios objeto del contrato, debe presentar previamente a la firma del contrato, documentaciones que acrediten el contrato de alquiler del mismo.

### **2.3.4. Adjudicación**

La forma de adjudicación será mediante subasta cerrada. Las ofertas serán evaluadas sobre la base de las condiciones legales, técnicas, económicas y financieras establecidas en las mismas.

A los efectos de formular el ordenamiento prioritario de las ofertas con vistas a la adjudicación, se considerarán los siguientes aspectos:

- Documentación técnica.
- Condiciones económica-financieras.
- Precio final.
- Tiempo de ejecución de la obra.

La mesa de contratación estará constituida por un presidente, un mínimo de cuatro vocales y un secretario designados por el órgano de contratación, el último entre funcionarios del mismo o, en su defecto, entre el personal a su servicio. Entre los vocales deberá figurar necesariamente un funcionario de entre quienes tengan atribuido legal o reglamentariamente al asesoramiento jurídico del órgano de contratación y un Interventor.

La documentación para las limitaciones se presentará en sobres cerrados, identificados, en su interior, con indicación de la licitación a la que concurran y firmados por el licitador o la persona que lo represente e indicación del nombre y apellidos o razón social de la empresa. En el interior de cada sobre se hará constar en hoja independiente su contenido, enunciado numéricamente. Uno de los sobres contendrá los documentos a que se refiere al artículo 79.2 de la Ley y el otro la proposición, ajustada al modelo que figure en el pliego de cláusulas administrativas particulares, conteniendo, en los concursos, todos los elementos que la integran, incluidos los aspectos técnicos de la misma.

Determinada por la mesa de contratación la proposición de precio más bajo o económicamente más ventajosa, a favor de la cual formulará la propuesta de adjudicación, invitará a los licitadores asistentes a que expongan cuantas observaciones o reservas estimen oportunas contra el acto celebrado, las cuales deberán formularse por escrito en el plazo máximo de dos días hábiles siguientes al de aquel acto y se dirigirán al órgano de contratación, el cual, previo informe de la mesa de contratación, resolverá el procedimiento, con pronunciamiento expreso sobre reclamaciones presentadas, en la adjudicación del contrato.

Se establece un rango razonable de precio de oferta, que estará comprendido entre el 10 y el 25 % del precio estimado para la ejecución de la obra. Las ofertas que se encuentren por debajo del límite inferior de este rango serán consideradas de riesgo de ejecución.

La Propiedad se reserva el derecho de rechazar algunas o todas las ofertas, incluida la de menor precio ofertado si las mismas, a su exclusivo juicio, no se ajustan a las condiciones del presente Pliego. Para poder adjudicar la licitación se deberá contar con tres ofertas válidas entre las que se determine la que sea más baja.

En caso de que entre las ofertas adjudicables apareciesen algunas iguales en precio y condiciones, se procederá a una nueva licitación limitada al precio, por propuesta cerrada, entre dichos ofertantes exclusivamente, señalándose al efecto día y hora dentro de un plazo que no exceda de una semana. La adjudicación será notificada al ofertante adjudicatario dejando establecidas las condiciones bajo las que haya sido adoptada, y de igual manera será también notificada a todos los ofertantes no adjudicatarios.

### **2.3.5. Arbitrajes y jurisdicción competente**

Como se ha indicado anteriormente la Propiedad designará una Dirección Técnica, a la que el Contratista comunicará por escrito el nombre del delegado del Contratista o jefe de obra (nombramiento que deberá ser aprobado por la Dirección Técnica).

Cualquier cuestión que surja entre las partes sobre la interpretación o cumplimiento del presente contrato, y no sea posible llegar a un acuerdo entre la Propiedad y el Contratista, será sometida a un arbitraje de equidad con arreglo a las normas que regulen este tipo de procedimiento.

En los contratos con firmas nacionales, se acatará el arbitraje de la Cámara de Comercio e Industria Española, basándose en la Ley 60/2003 de 23 de Diciembre (BOE 309 de 26 de Diciembre de 2003, sección 1, págs. 46097 a 46109). Con las firmas extranjeras se usarán las normas de arbitraje de la Cámara de Comercio de París.

### **2.3.6. Responsabilidades del contratista**

El contratista está obligado al cumplimiento de las disposiciones vigentes en materia laboral, de seguridad social y de seguridad e higiene en el trabajo. Deberá constituir el órgano necesario con función específica de velar por el cumplimiento de las disposiciones vigentes sobre seguridad e higiene en el trabajo y designará el personal técnico de seguridad que asuma las obligaciones correspondientes en cada centro de trabajo.

El incumplimiento de estas obligaciones por parte del contratista, o la infracción de las disposiciones sobre seguridad por parte del personal técnico designado por él, no implicarán responsabilidad alguna para la Administración contratante.

El contratista debe satisfacer los gastos de anuncio de licitación y de formalización del contrato, las tasas por prestación de los trabajos facultativos de replanteo, dirección, inspección y liquidación de las obras y cualesquiera otras que resulten de aplicación según las disposiciones vigentes, en la forma y cuantía que éstas señalen.

El contratista, para utilizar materiales, suministros, procedimientos y equipo para la ejecución de la obra deberá obtener las cesiones, permisos y autorizaciones necesarios de los titulares de las patentes, modelos y marcas de fábrica correspondientes, corriendo de su cuenta el pago de los derechos e indemnizaciones por tales conceptos.

El contratista será responsable de toda reclamación relativa a la propiedad industrial y comercial de los materiales, suministros, procedimientos y equipos utilizados en la obra, y deberá indemnizar a la Administración todos los daños y perjuicios que para la misma puedan derivarse de la interposición de reclamaciones, incluidos los gastos derivados de las que, eventualmente puedan dirigirse contra el Estado. Además, el contratista está obligado a mantener provisionalmente durante la ejecución de la obra y a reponer a su finalización todas aquellas servidumbres que se relacionen en el pliego de prescripciones técnicas particulares del proyecto base del contrato.

Tal relación podrá ser rectificada como consecuencias de la comprobación del replanteo o de necesidades surgidas durante su ejecución.

También tendrá que reponer aquellas servidumbres existentes con anterioridad al contrato que pudieran haberse omitido en la referida relación, si bien en este caso tendrá derecho a que se le abonen los gastos correspondientes.

Incumbe a la Administración promover las actuaciones precisas para legalizar las modificaciones que se deban introducir en las servidumbres que sean consecuencia de concesiones administrativas existentes antes de comenzar la obra. En este caso, la imputación de los gastos de tales modificaciones se registrará exclusivamente por los términos de la propia concesión aceptada, por las legislaciones específicas de tales concesiones o por la Ley de Expropiación Forzosa, en su caso

Además, el contratista tendrá derecho a ser indemnizado por la Administración en los casos y forma que determina y establece en el Reglamento General de Contratación, si bien en el expediente deberá acreditar que, previamente al suceso, había tomado las medidas y precauciones razonables para prevenir y evitar, en lo posible, que las unidades de obra ejecutadas y los materiales acopiados en la obra pudieran sufrir daños por eventos de la naturaleza.

En la valoración de los daños causados se tendrá en cuenta la adopción de las medidas y precauciones razonables por parte del contratista, a fin de segregar de aquella los daños que hubiesen podido evitar, de haberse tomado las medidas oportunas previas o inmediatamente después de acaecer el hecho causa de los daños.

### **2.3.7. Subcontratas**

Salvo que el contrato disponga lo contrario o que por su naturaleza y condiciones se deduzca que ha de ser ejecutado directamente por el adjudicatario, podrá éste concertar con terceros la realización parcial del mismo.

Los subcontratos se someten al cumplimiento de los siguientes requisitos:

- Que en todo caso se dé conocimiento por escrito a la Administración del subcontrato a celebrar, con indicación de las partes del contrato a realizar por el Subcontratista.
- Que las prestaciones parciales que el adjudicatario subcontrate con terceros no excedan del porcentaje que, superior al 50% del importe de adjudicación, se fije en el pliego de cláusulas administrativas particulares. En el supuesto de que tal previsión no figure en el pliego, el contratista podrá subcontratar hasta un porcentaje que no exceda del indicado 50% del importe de adjudicación.
- Que el Contratista se obligue a abandonar a los subcontratistas y suministradores el pago del precio pactado con unos y otros en los plazos y condiciones que no sean más desfavorables que los establecidos para las relaciones entre Administración y contratista.
- Los Subcontratistas quedarán obligados sólo ante el contratista principal que asumirá, por tanto, la total responsabilidad de la ejecución del contrato frente a la

Administración, con arreglo estricto a los pliegos de cláusulas administrativas particulares y a los términos del contrato.

En ningún caso podrá concertarse por el contratista la ejecución parcial del contrato con personas inhabilitadas para contratar de acuerdo con el ordenamiento jurídico.

El contratista deberá abonar las facturas en el plazo fijado de conformidad con el artículo 4 de la Ley por la que se establecen medidas de lucha contra la morosidad en las operaciones comerciales. En caso de demora en el pago, el subcontratista o el suministrador tendrá derecho al cobro de los intereses de demora y la indemnización por los costes de cobro en los términos previstos en la misma Ley.

Cuando el plazo de pago se convenga más allá de sesenta días, dicho pago se instrumentará mediante un documento que lleve aparejada la acción cambiaria; y cuando el plazo de pago supere los ciento veinte días, podrá además exigirse por el subcontratista o suministrador que dicho pago se garantice mediante aval. Estos subcontratos y los contratos de suministros tendrán en todo caso naturaleza privada.

#### **2.3.8. Accidentes de trabajo**

El Contratista cumplirá estrictamente y hará cumplir a su personal las disposiciones de la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el trabajo (BOE 188 de 7 de Agosto de 1997, sec. 1, págs. 24063 a 24070), así como las normas de seguridad de la Propiedad, ya sean generales o particulares.

El Contratista designará un miembro de su organización en la obra cuya obligación será la de velar por la prevención de accidentes y el cumplimiento de las normas que regulen la materia. El nombre y cargo de la persona que se designe será comunicado por el Contratista a la Propiedad antes de comenzar el trabajo. Deberá equipar a su personal de los elementos de protección adecuados al trabajo que realicen, obligatorios según la Reglamentación en vigor de Higiene y Seguridad en el Trabajo. Estos medios de protección personal para los trabajadores serán homologados por el Servicio Social de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

Todas las herramientas y equipos del Contratista serán adecuadas para el trabajo y no afectarán a la seguridad ni a los elementos de protección personal. Si las herramientas fueran inadecuadas o peligrosas, a juicio de la representación de la Propiedad, deberán ser sustituidas por otras a cargo del Contratista.

El Contratista adoptará cuantas medidas sean necesarias para evitar la caída de operarios, desprendimiento de herramientas y materiales que puedan poner en peligro la integridad física de alguna persona, siendo el responsable de los daños ocasionados si llegan a concurrir.

Si se incumplen las normas de seguridad o las dictadas por las autoridades competentes, ya sean generales o particulares de la Propiedad, la Propiedad se reserva el derecho a ejercer cualquiera de las siguientes acciones:

- Imposición de multas al Contratista, hasta un importe equivalente al beneficio del contrato correspondiente a las obras que estuviera ejecutando, para lo cual este porcentaje deberá constar explícitamente en su oferta.
- Expulsión del complejo, de la persona, o personas, que las hayan incumplido.
- Suspensión de la ejecución de los trabajos mientras no se asegure el total cumplimiento. Esta suspensión no será justificativa para ampliar el plazo de ejecución establecido.
- Rescisión del contrato, ejecutando las acciones correspondientes por indemnización de daños y perjuicios.

En caso de accidentes o peligro inminente, en el que exista riesgo para las vidas de las personas, para la obra en curso, para otras obras ya ejecutadas o para las propiedades colindantes, se autorizará al Contratista para actuar a discreción en cuanto sea necesario para prevenir las pérdidas o daños que pudieran producirse, debiendo ejecutar tales órdenes inmediatamente. Las compensaciones que el Contratista reclame como consecuencia de estos trabajos de emergencia se fijarán de común acuerdo o mediante arbitraje.

El Contratista será el único y exclusivo responsable, durante la ejecución de los trabajos, de todos los accidentes que puedan sufrir sus operarios o causados por él a otras personas, entidades o cosas, asumiendo todas las responsabilidades ajenas a la legislación vigente sobre accidentes de trabajo, daños a las cosas, propiedades de terceros, etc. Si se presupone un diagnóstico superior al leve en accidente de trabajo, el Contratista, o su representante, deberá personarse en las oficinas de personal de la Propiedad para comunicar tal circunstancia y facilitar los datos personales del accidentado, tipo de accidente ocurrido, lugar, causa y cuantos datos aclaratorios sean necesarios.

El Contratista informará a la Propiedad con la máxima urgencia de cualquier dificultad de tipo laboral que surja entre él y sus trabajadores, a fin de que, por parte de la Propiedad puedan adoptarse las medidas oportunas con relación al caso que se trate.

### **2.3.9. Rescisión de contrato**

Cuando, a juicio de la Propiedad, el incumplimiento por parte del Contratista de alguna de las cláusulas contractuales establecidas en cualquier medida, extensión o modalidad, siempre que a juicio de la Dirección Técnica sea por descuido inexcusable o mala fe manifiesta, pudiera ocasionar graves trastornos en la realización de las obras, en el cumplimiento de los plazos, o en su aspecto económico, la Propiedad podrá decidir la resolución de las obras, con las generalidades a que hubiera lugar. Así mismo podrá proceder a la resolución con la pérdida de la fianza, de producirse alguno de los siguientes casos:

- Muerte o incapacidad del Contratista.
- Quiebra o incapacidad económica del Contratista. En caso de quiebra del Contratista se hará un concurso entre los acreedores del mismo. El contrato quedará rescindido, a

no ser que los sindicatos correspondientes ofrezcan llevar a cabo la obra bajo las condiciones estipuladas en este convenio y en los documentos adicionales. La empresa contratante podrá admitir o rechazar el ofrecimiento sin que en este último caso tenga derecho a indemnización alguna. Igualmente quedará rescindido el contrato cuando el contratista no cumpla las obligaciones contraídas en el contrato.

- La disolución por cualquier causa de la sociedad. Alteraciones del contrato por alguna de las siguientes causas:
  - 
  - Modificación del proyecto de tal forma que represente alteraciones fundamentales del mismo a juicio de la Dirección Técnica, y en cualquier caso siempre que la variación del presupuesto de contrata, como consecuencia de estas modificaciones, represente alrededor del 25% como mínimo del importe actual.
  - Modificación de las unidades de obra en número superior al 50% del total.
  - Cuando se cumpla el plazo final de las obras y falte por ejecutar más del 20% del presupuesto de obra. La imposición de las multas establecidas por los retrasos no obligará a la Propiedad a la prórroga del mismo, siendo potestativo por su parte elegir ante la resolución o la continuidad del contrato.
- Cuando no se hubiera realizado el montaje de las instalaciones y unidades auxiliares o no se hubiera aportado la maquinaria relacionada en la oferta o su equivalente en potencia o capacidad en los plazos previstos con un margen del 25%; o en el caso de que el Contratista sustituya maquinaria sin autorización.
- Cuando transcurrido un tiempo de tres meses consecutivos y considerados conjuntamente, no se alcanzase un 50% del programa aprobado para la obra.
- La suspensión de la obra una vez comenzada, siempre que el plazo de suspensión haya excedido de un mes, y en todo caso siempre que por causas ajenas a la contrata no se dé comienzo a la obra dentro del plazo de 60 días, contados a partir de la adjudicación, en cuyo caso la devolución de la fianza será automática.
- En caso de rescisión del contrato con el Contratista por causas de fuerza mayor se abonará al mismo tiempo el importe de la obra ejecutada y valoración de los materiales que haya hecho acopio de la misma.
- La inobservancia del plan cronológico de la obra y en especial del plazo de ejecución y terminación total de la misma.

En caso de cancelación, la Propiedad tendrá derecho a estar inmediatamente en posesión de los pedidos en curso y de la parte o partes de la obra que la Propiedad seleccione, junto con los materiales y herramientas, bien sean de la parte contratante o del Contratista, y completar el trabajo. El Contratista será razonablemente pagado por el alquiler que haya sido convenido con la Propiedad por el uso de las herramientas del Contratista, o si este lo prefiere, puede retirar dichas herramientas siempre y cuando:

- El retiro de tales herramientas no afecte a la terminación de las obras.
- La propiedad esté de acuerdo con dicho retiro.



- El coste del retiro vaya a cuentas del Contratista.

Las herramientas del Contratista, empleadas por la empresa contratante para la terminación de la obra, serán desmanteladas, cargadas y si es el caso, preparadas para el embarque por la Propiedad. Todos los costes derivados después de que las herramientas sean cargadas al transporte o abandonen los dominios de la Propiedad, serán por cuenta del Contratista, independientemente de que sean manejadas, movidas o embarcadas por el Contratista o por la Propiedad. Todos los materiales o equipos que estén bajo pedido en el momento de la cancelación serán manejados hasta su entrega y facturación indistintamente por la Propiedad o por la empresa contratada, según se decida en el tiempo de cancelación del contrato.

El Contratista será reembolsado por todas las facturas que deba o hayan sido pagadas después de la cancelación, de acuerdo con las condiciones aplicables a lo gastado más el porcentaje. Cuando la Propiedad así lo solicite, el Contratista le transferirá todos los pedidos abiertos o pedidos cuyos materiales no hayan sido entregados. En tal caso, el vendedor será informado de la transferencia por el Contratista y cambiará de manera correspondiente su procedimiento de facturación.

En el caso de que dichas facturas sean remitidas al Contratista, para su pago, entre las dos partes habrá de llegarse a un acuerdo mutuo con respecto al método más satisfactorio de manejo.

Siempre que el Contratista sea requerido para procesar y facturar dichas facturas deberá ser reembolsado por tales costes más el porcentaje especificado.

En el caso de que la cancelación de este convenio se deba a la decisión de la Propiedad para no continuar la obra, o por otras causas fuera de control con respecto a la conclusión de la obra, todos los convenios que aquí figuran serán aplicados con las siguientes especificaciones:

- El Contratista procederá inmediatamente a cancelar todas las órdenes de compra de materiales o equipos entregados, avisando a cada vendedor de la intención de cancelar dichas órdenes. El vendedor avisará de los cargos de cancelación y, de existir éstos, él deberá notificar detalladamente tales cargos al Contratista. Éste avisará entonces inmediatamente a la Propiedad de dichos cargos y solicitará una declaración de aceptación de la Propiedad.
- La Propiedad reembolsará al vendedor todos los costes mencionados, bien sean costes de cancelación del vendedor u otros costes resultantes de la cancelación.
- En general, la Propiedad rescatará cualquier envío sobre el que la cancelación sea del 100% del precio de compra, aunque el Contratista avisará a la Propiedad de dichos pagos antes de que el vendedor sea notificado para continuar.

## CAPÍTULO 3: CONDICIONES PARTICULARES

Las condiciones particulares o prescripciones técnicas consisten en la realización de una descripción de los materiales, equipos y obras que van a realizarse en el proyecto, así como la forma de ejecución de las mismas. Quedando recogidas a su vez las obligaciones de orden técnico que correspondan al Contratista y al Director Técnico o Ingeniero.

### 3.1. Disposiciones de carácter particular

Las disposiciones de carácter particular y de ámbito técnico son:

- Normativa de la Asociación Española de Normalización (AENOR).
- Normas Tecnológicas de Edificación:
  - Instalaciones de fontanería. Abastecimiento (IFA).
  - Instalaciones de salubridad. Alcantarillado (ISA).
  - Instalaciones eléctricas. Puesta a tierra (JET).

### 3.2. Condiciones de materiales, equipos y maquinaria

#### 3.2.1. Materiales de construcción

Los materiales empleados en la construcción, han de cumplir las normas recogidas en el catálogo de normas UNE de 1992. Para aquellos materiales en los que no haya nada especificado, se seguirán las instrucciones de la Dirección Técnica, y en cualquier caso serán de la mejor calidad entre los de su clase.

Además estos materiales podrán ser sometidos a pruebas o análisis por cuenta de la contrata que se crean necesarios para acreditar su calidad; aquel material que a juicio de la Dirección Técnica no reúna las condiciones exigidas será rechazado (Tabla PC.1).

**Tabla 3.1.**

Normas a verificar por los materiales de construcción (Catálogo de Normas UNE, 1992)

Normas de materiales		
Material	Número de Norma	Página
Producto cerámico para la construcción	23	370-371
Cemento	43	383-384
Producto de cemento reforzado con fibras	19	398
Prefabricados de cemento y caucho	21	416-417
Hormigón	100	389-392
Materiales impermeabilizantes para la construcción	130	402-408
Pinturas y barnices	166	293-298
Materiales cerámicos de arcilla cocida para la construcción	30	419-420
Ensayos materiales	255	113-121
Materiales refractarios	40	365-366

### 3.2.2. Materiales para la fabricación de equipos

El material a utilizar en la fabricación de los equipos es el que se especifique en el anexo correspondiente al diseño de cada uno de los equipos. Los materiales utilizados en los equipos de la instalación son acero inoxidable AISI 316 L y acero Carpenter 20 Mo-6.

Las diferentes normas a las que están sujetos los materiales para la fabricación de los equipos y ensayos de estos materiales son:

- **UNE 7183:1964** Método de ensayo para determinar la uniformidad de los recubrimientos galvanizados, aplicados a los materiales manufacturados de hierro y acero.
- **UNE-EN ISO 1461:1999** Recubrimientos galvanizados en caliente sobre productos acabados de hierro y acero. Especificaciones y métodos de ensayo. (ISO 1461:1999).
- **UNE-EN 10257-1:1998** Alambres de acero no aleado recubiertos de cinc o aleaciones de cinc para armado de cables para el transporte de energía o cables para telecomunicaciones. Parte 1: Cables terrestres.
- **UNE-EN 10257-1:1998** Alambres de acero no aleado recubiertos de cinc o aleaciones de cinc para armado de cables para el transporte de energía o cables para telecomunicaciones. Parte 1: Cables terrestres.
- **UNE 37505:1989** Recubrimientos galvanizados en caliente sobre tubos de acero. Características y métodos de ensayo.
- **UNE 112022:1993** Recubrimientos metálicos. Recubrimientos electrolíticos de cromo. Ensayo de corrosión electrolítica (ensayo, etc. ).
- **UNE 112036:1993** Recubrimientos metálicos. Depósitos electrolíticos de cinc sobre hierro o acero.
- **UNE 112039:1994** Recubrimientos de aleación de estaño-níquel. Especificaciones y métodos de ensayo.
- **UNE 112040:1994** Recubrimiento electrolítico de aleación estaño-plomo. Especificaciones y métodos de ensayo.
- **UNE 112041:1994** Recubrimiento metálico. Depósitos electrolíticos de estaño. Especificaciones y métodos de ensayo.
- **UNE-EN ISO 1461:1999** Recubrimientos galvanizados en caliente sobre productos acabados de hierro y acero. Especificaciones y métodos de ensayo. (ISO 1461:1999).
- **UNE-EN 12502-3:2005** Protección de materiales metálicos contra la corrosión. Recomendaciones para la evaluación del riesgo de corrosión en sistemas de distribución y almacenamiento de agua. Parte 3: Factores que influyen para materiales férreos galvanizados en caliente.
- **UNE 37553:1973** Recubrimientos electrolíticos de cinc y cadmio sobre tortillería con rosca métrica de perfil triangular ISO.
- **UNE 112017:1992** Recubrimientos metálicos. Medición del espesor. Métodos por espectrometría de rayos X.
- **UNE-EN ISO 4516:2002** Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayos de microdureza Vickers y Knoop. (ISO 4516:2002).

- **UNE-EN 12540:2001** Protección de metales contra la corrosión. Recubrimientos electrolíticos de níquel, níquel más cromo, cobre más níquel y cobre más níquel más cromo.
- **UNE-EN 12476:2001** Recubrimientos de conversión fosfatantes de metales. Método de especificación de requisitos.
- **UNE-EN 582:1994** Proyección térmica. Medida de la adherencia por ensayo de tracción. (Versión oficial en UNE 112051:1994).
- **UNE-EN ISO 2063:2005** Proyección térmica. Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos inorgánicos. Cinc, aluminio y sus aleaciones (ISO 2063:2005).
- **UNE-EN ISO 10289:2001** Métodos de ensayo de corrosión de recubrimientos metálicos y no orgánicos sobre sustratos metálicos. Clasificación de probetas y piezas de protección sometidas a ensayos de corrosión. (ISO 10289:1999).
- **UNE-EN ISO 2064:2001** Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Definiciones y principios concernientes a la medida del espesor. (ISO 2064:1996).
- **UNE-EN ISO 2177:2005** Recubrimientos metálicos. Medida del espesor. Método coulombimétrico por disolución anódica. (ISO 2177:2003).
- **UNE-EN ISO 2178:1996** Recubrimientos metálicos no magnéticos sobre metal base magnético. Medida del espesor. Método magnético (ISO 2361:1982).
- **UNE-EN ISO 21787:2007** Válvulas industriales. Válvulas de globo de materiales termoplásticos (ISO 21787:2006).
- **UNE-EN ISO 2819:1996** Recubrimientos metálicos sobre base metálica. Depósitos electrolíticos y depósitos por vía química. Lista de los diferentes métodos de ensayo de adherencia (ISO 2819:1980).
- **UNE-EN ISO 3892:2002** Recubrimientos de conversión sobre materiales metálicos. Determinación de la masa de recubrimiento por unidad de superficie. Métodos gravimétricos. (ISO 3892:2000).
- **UNE-EN ISO 4518:1986** Recubrimiento metálicos. Medición del espesor. Método perfilométrico (ISO 4518:1980).
- **UNE-EN ISO 10289:2001** Métodos de ensayo de corrosión de recubrimientos metálicos y no orgánicos sobre sustratos metálicos. Clasificación de probetas y piezas de protección sometidas a ensayos de corrosión. (ISO 10289:1999).
- **UNE-EN ISO 4543:1996** Recubrimiento metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Directrices generales para los ensayos de corrosión aplicables a condiciones de almacenamiento (ISO 4543:1981).
- **UNE-EN ISO 6988:1996** Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de humedad. (ISO 6988:1985).
- **UNE-EN ISO 7384:1996** Ensayos de corrosión en atmósfera artificial. Prescripciones generales. (ISO 7384:1986).
- **UNE-EN ISO 7441:1996** Corrosión de los metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bimetalica mediante ensayos de corrosión en medio exterior. (ISO 7441:1984).
- **UNE-EN ISO 7539-1:1996** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayo de corrosión bajo tensión. Parte 1: guía general de métodos de ensayo (ISO 7539-1:1987).

- **UNE-EN ISO 7539-2:1996** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 2: preparación y utilización de probetas para ensayos de flexión. (ISO 7539-2:1987).
- **UNE-EN ISO 7539-3:1996** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 3: preparación y utilización de probetas dobladas en U. (ISO 7539-3:1989).
- **UNE-EN 12330:2001** Protección contra la corrosión de metales. Recubrimientos electrolíticos de cadmio sobre hierro o acero.
- **UNE-EN ISO 6158:2005** Recubrimientos metálicos. Recubrimientos electrolíticos de cromo para fines industriales. (ISO 6158:2004)
- **UNE-EN ISO 8401:1996** Recubrimientos metálicos. Revisión de los métodos de determinación de la ductilidad. (ISO 8401:1986).
- **UNE-EN 10289:2001** Métodos de ensayo de corrosión de recubrimientos metálicos y no orgánicos sobre sustratos metálicos. Clasificación de probetas y piezas de protección sometidas a ensayos de corrosión. (ISO 10289:1999).
- **UNE-EN ISO 8565:1996** Metales y aleaciones. Ensayos de corrosión atmosférica. Requisitos generales para realizar ensayos in situ. (ISO 8565:1992).
- **UNE-EN ISO 9220:1996** Recubrimientos metálicos. Medida del espesor del recubrimiento. Método de microscopía electrónica de barrido. (ISO 9220:1988).
- **UNE-EN ISO 10062:1996** Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales con muy bajas concentraciones de gases contaminantes (ISO 10062:1991).
- **UNE-EN ISO 9251:1996** Aislamiento térmico Condiciones de transmisión térmica y propiedades de los materiales. Vocabulario (ISO 9251:1987).
- **UNE-EN ISO 9346:1996** Aislamiento térmico. Transferencia de masa. Magnitudes físicas y definiciones (ISO 9346:1987).
- **UNE-EN 12329:2001** Protección contra la corrosión de los metales. Recubrimientos electrolíticos de cinc sobre hierro o acero.
- **UNE-EN 12330:2001** Protección contra la corrosión de metales. Recubrimientos electrolíticos de cadmio sobre hierro o acero.
- **UNE-EN ISO 1463:2005** Recubrimientos metálicos y capas de óxido. Medida del espesor. Método de corte micrográfico (ISO 1463:2003)
- **UNE-EN ISO 2361:1996** Recubrimientos electrolíticos de níquel sobre base metálica magnética y no magnética. Medición del espesor. Método magnético (ISO 2361:1982).
- **UNE-EN ISO 3868:1996** Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Medida del espesor. Método basado en el principio de *Fizeau* de interferometría de haz múltiple. (ISO 3868:1976).
- **UNE-EN ISO 12241:1999** Aislamiento térmico para equipos de edificación e instalaciones industriales. Método de cálculo. (ISO 12241:1998).
- **UNE-EN ISO 8990:1997** Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada (ISO 8990:1994).
- **UNE 92102:1998** Materiales aislamiento térmico. Lana de vidrio. Definiciones, clasificación y características.

- **UNE 92201:1989** Materiales aislantes térmicos. Determinación de la conductividad térmica. Técnica de la placa calefactora con anillo de guarda y doble placa refrigerante.
- **UNE 92208:1999** Materiales aislantes térmicos. Productos de lana de vidrio/o roca. Determinación de la cantidad de vidrio y aglomerante orgánico.
- **UNE 92209:1989** Materiales aislantes térmicos. Productos de fibra de vidrio/ o roca. Determinación de las dimensiones.
- **UNE-EN 13469:2002** Productos aislantes térmicos para equipos de edificación e instalaciones industriales. Determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua en coquillas aislantes preformadas.
- **UNE 92227:1989** Materiales aislantes térmicos. Determinación de la absorción de agua por el método de vacío.
- **UNE-EN 13467:2002** Productos aislantes térmicos para equipos de edificación e instalaciones industriales. Determinación de las dimensiones, rectangularidad y linealidad de coquillas aislantes preformadas.
- **UNE-EN ISO 7345:1987** Aislamiento térmico. Magnitudes físicas y definiciones (ISO 8497:1987).
- **UNE-EN ISO 8497:1997** Aislamiento térmico. Determinación de las propiedades relativas a la transmisión de calor en régimen estacionario en los aislamientos térmicos para tuberías (ISO 8497:1994).
- **UNE-EN ISO 7539-4:1996** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 4: preparación y utilización de probetas para ensayos de tracción uniaxial. (ISO 7539-4:1989).
- **UNE-EN ISO 7539-5:1996** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 5: preparación y uso de probetas con forma de anillo en C (ISO 7539-6:1989).
- **UNE-EN ISO 7539-6:1996** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 6: preparación y uso de probetas prefiguradas para ensayos bajo carga constante o desplazamiento constante (ISO 7539-6:1989).
- **UNE-EN ISO 7539-7:2006** Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 7: Ensayo a baja velocidad de deformación. (ISO 7539-7:2005).

### 3.2.3. Equipos

Las normas a las que se encuentran sujetos todos los equipos están recogidas en el Catálogo de Normas UNE de 1992, en la siguiente tabla se muestran el número de normas y la localización de las mismas en dicho catálogo:

**Tabla 3.2.**

Normas a cumplir por los equipos (Catálogo de Normas UNE, 1992)

Normas a cumplir por los equipos		
Concepto	Número de Norma	Páginas
Seguridad en el almacenamiento y manipulación de productos químicos	3	411-412
Bienes de equipo para la Industria Química	10	355-361
Tuberías y accesorios	60	126-128

### 3.2.4. Maquinaria

Las normas que debe cumplir la maquinaria es la que se refleja en la tabla que se muestra a continuación.

**Tabla 3.3.**

Normas a cumplir por la maquinaria (Catálogo de Normas UNE, 1992)

Normas a cumplir por los equipos		
Concepto	Número de Norma	Páginas
Herramientas	67	126-128
Maquinaria de elevación y transporte	165	355-361
Maquinaria para movimientos de tierra	36	411-412

### 3.3. Condiciones de ejecución

Las condiciones de ejecución y condiciones funcionales de los materiales y equipos industriales, control de la ejecución, seguridad en el trabajo, medición, valoración y mantenimiento serán establecidos en las normas NBE y NTE, así como las correspondientes si procede a equipos, materiales o maquinaria. En los siguientes apartados se expondrán las consideraciones que se realizarán con respecto a las condiciones de ejecución.

#### 3.3.1. Movimientos de tierra y obras de saneamiento

Quedan incluidos los terraplenes para dar al terreno la rasante de explanación y excavaciones de zanjas y pozos. La excavación debe ajustarse a las dimensiones que figuren en los planos o a lo indicado por el ingeniero.

Se incluyen los sistemas de captación y conducción de aguas del subsuelo para protección de la obra contra la humedad y las redes de evacuación de aguas pluviales y residuos, desde los puntos donde se cogen hasta la red de alcantarillados, pozos de filtración o equipos de depuración.

#### 3.3.2. Cimentaciones

Incluyen las operaciones de eliminación de troncos, raíces de árboles y otros obstáculos que se encuentren en la zona de interés, según normas NBE y NTE. Las zanjas de cimentación se excavarán hasta una profundidad especificada en los planos; pero siempre debe estar aprobada por el Ingeniero antes de colocar el hormigón o ladrillo.

#### 3.3.3. Estructuras metálicas

Quedan recogidas las operaciones relacionadas con el diseño, fabricación y montaje de acero para estructuras, según normas NBE, NTE y las especificadas para materiales.

### **3.3.4. Albañilería, cerrajería, carpintería y fontanería**

Se incluyen las instalaciones en los puntos señalados por los planos, de los bloques de hormigón, ladrillo, piedra y revestimientos de suelos, escaleras y techos.

Recoge todos los trabajos relacionados con la instalación de puertas, ventanas y demás elementos de carpintería general y de taller de construcción de edificios. En la cerrajería, se incluyen las operaciones relacionadas con ajustes para obtener un acabado perfecto. Así como se indican las operaciones de abastecimiento y distribución de agua

### **3.3.5. Cubierta de edificios**

Se incluye todo lo relacionado con la impermeabilización y el aislamiento de cubiertas de edificios.

A causa de posibles inclinaciones, los aislamientos se graparán, para evitar deslizamiento o movimientos inesperados.

### **3.3.6. Instalaciones eléctricas, calefacción y ventilación**

Se incluyen las operaciones relacionadas con la distribución del alumbrado y las instalaciones de ventilación, calefacción y refrigeración.

### **3.3.7. Instalaciones de protección contra incendios**

Se indican las instalaciones de protección contra fuegos y pararrayos.

### **3.3.8. Pinturas y vidrieras**

Se refiere a todas las operaciones de acabado de pinturas y de las superficies exteriores del edificio, incluyendo la pintura protectora de las superficies metálicas.

En las vidrieras se incluyen las operaciones relacionadas con su instalación. Las dimensiones especificadas en los planos.

### **3.3.9. Otras instalaciones no específicas**

Si en el transcurso fuese necesario ejecutar alguna clase de obra no regulada en el pliego, el Contratista quedará obligado a ejecutarla con arreglo a las instrucciones que reciba del ingeniero, quien a su vez cumplirá la normativa vigente. El Contratista no tendrá derecho a reclamación ninguna.



## CAPÍTULO 4: Condiciones particulares de los equipos

El objeto del presente capítulo es la exposición de las especificaciones técnicas que deben satisfacer los distintos equipos, diseñados o de adquisición directa por compra, para que sean aceptados en la instalación que se proyecta.

Los equipos deben entregarse con las pruebas hidráulicas que correspondan, realizadas de forma satisfactoria. La instalación solo será llevada a cabo cuando se demuestre que todos los equipos de la línea de proceso y dispositivos de control funcionan perfectamente.

### 4.1. Especificaciones del intercambiador de calor IC-01

**Tabla 4.1.**  
Especificaciones del intercambiador de calor IC-01

Descripción		Intercambiador de calor de carcasa y tubos horizontal
<b>Tubos</b>	Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
	Diámetro exterior	0,03175 m
	Diámetro interior	0,0269 m
	Espesor	$2,413 \cdot 10^{-3}$ m
	Disposición	Cuadrada
	Número de tubos	352
	Pitch	0,0397 m
	Longitud	0,610 m
	Número de pasos	1
<b>Carcasa</b>	Material	Acero SA-240
	Diámetro exterior	0,9906 m
	Espesor	0,00508 m
	Número de pasos	1
<b>Aislamiento</b>	Material	Lana de roca
	Espesor	80 mm

## 4.2. Especificaciones del intercambiador de calor IC-02

**Tabla 4.2.**  
Especificaciones del intercambiador de calor IC-02

Descripción		Intercambiador de calor de carcasa y tubos horizontal
<b>Tubos</b>	Material	Acero SA-240
	Diámetro exterior	0,03175 m
	Diámetro interior	0,0269 m
	Espesor	$2,413 \cdot 10^{-3}$ m
	Disposición	Cuadrada
	Número de tubos	73
	Pitch	0,0397 m
	Longitud	0,3048 m
	Número de pasos	1
<b>Carcasa</b>	Material	Acero SA-240
	Diámetro exterior	0,4953 m
	Espesor	0,00508 m
	Número de pasos	1
<b>Aislamiento</b>	Material	Lana de roca
	Espesor	80 mm

### 4.3. Especificaciones del reactor R-01

**Tabla 4.3.**  
Especificaciones del reactor R-01

Descripción		Reactor de carcasa y tubos vertical
<b>Tubos</b>	Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
	Diámetro exterior	0,0254 m
	Diámetro interior	0,02057 m
	Espesor	$4,83 \cdot 10^{-3}$ m
	Disposición	Cuadrada
	Número de tubos	600
	Pitch	0,03175 m
	Longitud	3,048 m
<b>Catalizador</b>	Tipo	$\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$
	Masa	500 kg
	Porosidad	0,4
	Densidad de partícula	$1666,67 \text{ kg/m}^3$
<b>Carcasa</b>	Material	Acero SA-240
	Diámetro exterior	0,9652 m
	Espesor	0,00762 m
	Número de pasos	1
<b>Deflectoras</b>	Tipo	Segmentadas
	Número de deflectoras	4
	Espesor	0,0095 m
	Espaciamiento	0,762 m
<b>Soporte</b>	Tipo	Faldones
<b>Aislamiento</b>	Material	Lana de roca
	Espesor	50 mm

#### 4.4. Especificaciones del intercambiador de calor IC-03

**Tabla 4.4.**  
Especificaciones del intercambiador de calor IC-03

Descripción		Intercambiador de calor de carcasa y tubos horizontal
<b>Tubos</b>	Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
	Diámetro exterior	0,03175 m
	Diámetro interior	0,0269 m
	Espesor	$2,413 \cdot 10^{-3}$ m
	Disposición	Cuadrada
	Número de tubos	252
	Pitch	0,0397 m
	Longitud	0,762 m
	Número de pasos	1
<b>Carcasa</b>	Material	Acero SA-240
	Diámetro exterior	0,8382 m
	Espesor	0,00508 m
	Número de pasos	1
<b>Aislamiento</b>	Material	Lana de roca
	Espesor	50 mm

#### 4.5. Especificaciones de la columna de absorción A-01

**Tabla 4.5.**  
Especificaciones del absorbedor A-01

Descripción		Columna de absorción de relleno vertical
<b>Relleno</b>	Tipo	Anillos Raschig
	Dimensión normalizada	1 pulgada (0,0254 m)
	Porosidad	0,73
	Área interfacial por unidad de volumen	$37,186 \text{ m}^{-1}$
<b>Carcasa</b>	Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
	Diámetro interior	3,96 m
	Espesor	0,00381 m
	Altura	3,72 m
<b>Soporte</b>	Tipo	Faldones
<b>Aislamiento</b>	Material	Lana de roca
	Espesor	50 mm

#### 4.6. Especificaciones del intercambiador de calor IC-04

**Tabla 4.6.**  
Especificaciones del intercambiador de calor IC-04

Descripción		Intercambiador de calor de carcasa y tubos horizontal
<b>Tubos</b>	Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
	Diámetro exterior	0,0191 m
	Diámetro interior	0,0143 m
	Espesor	$2,413 \cdot 10^{-3}$ m
	Disposición	Cuadrada
	Número de tubos	26
	Pitch	0,0254 m
	Longitud	2,134 m
	Número de pasos	1
<b>Carcasa</b>	Material	Acero SA-240
	Diámetro exterior	0,2032 m
	Espesor	0,00508 m
	Número de pasos	1
<b>Deflectoras</b>	Tipo	Segmentadas
	Número de deflectoras	3
	Espesor	0,00476 m
	Espaciamiento	0,713 m
<b>Aislamiento</b>	Material	Lana de roca
	Espesor	50 mm

#### 4.7. Especificaciones del mezclador M-01

**Tabla 4.7.**  
Especificaciones del mezclador M-01

Descripción	Mezclador de techo flotante cubierto
Unidades	1
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
Volumen total	1,667 m <sup>3</sup>
Volumen útil	1,504 m <sup>3</sup>
Diámetro interior	1,280 m
Altura	1,295 m
Espesor de la carcasa	3,81 mm
Espesor del fondo plano	3,81 mm
Espesor del techo flotante	3,81 mm
Soporte del tanque	Soporte de hormigón de 0,5 m
Accesorios	Sistema de venteo, boca de hombre y escalera de acceso
Agitación	Turbina colocada a 0,457 m del fondo del tanque, con diámetro de 0,457 m, anchura de hélices de 0,091 m y motor de 1491 W de potencia
Placas deflectoras	4 placas con un espesor de 0,137 m

#### 4.8. Especificaciones del depósito “Rundown”

**Tabla 4.8.**  
Especificaciones del depósito “Rundown”

Descripción	Depósitos de techo flotante cubierto
Unidades	1
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
Volumen total	160,128 m <sup>3</sup>
Volumen útil	144,338 m <sup>3</sup>
Diámetro interior	6,096 m
Altura	5,490 m
Espesor de la carcasa	5,08 mm
Espesor del fondo plano	5,08 mm
Espesor del techo flotante	3,81 mm
Soporte del tanque	Soporte de hormigón de 0,5 m
Accesorios	Sistema de venteo, 2 bocas de hombre y escalera de acceso

#### 4.9. Especificaciones de los depósitos de almacenamiento

**Tabla 4.9.**

Especificaciones de los depósitos de almacenamiento

Descripción	Depósitos de techo flotante cubierto
Unidades	4
Material	Acero Carpenter 20 Mo-6
Volumen total	520,416 m <sup>3</sup>
Volumen útil	252,591 m <sup>3</sup>
Diámetro interior	9,144 m
Altura	7,920 m
Espesor de la carcasa	6,35 mm
Espesor del fondo plano	6,35 mm
Espesor del techo flotante	3,81 mm
Soporte del tanque	Soporte de hormigón de 0,5 m
Accesorios	Sistema de venteo, 2 bocas de hombre y escalera de acceso

#### 4.10. Especificaciones de los equipos de impulsión de fluidos

**Tabla 4.10.**

Especificaciones de los equipos de impulsión

Descripción	Marca	Modelo	Unidades
Bomba centrífuga	Liquiflo	620 Sealed	8
Soplante	Aerzen	GR/Bra/GRb	6

#### 4.11. Especificaciones de las conducciones

**Tabla 4.11.**  
Especificaciones de las conducciones de proceso

Conducción	Diámetro nominal (in)	Diámetro externo (in)	Espesor (in)	Longitud (m)	Material
C-01	0,75	1,050	0,113	24,6	Acero AISI 316 L
C-02	18	17,500	0,250	3	Acero AISI 316 L
C-03	20	19,500	0,250	1,5	Acero AISI 316 L
C-04	20	19,500	0,250	7,5	Acero AISI 316 L
C-05	20	19,500	0,250	8,3	Acero AISI 316 L
C-06	20	19,500	0,250	10,3	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-07	20	19,500	0,250	7	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-08	18	17,500	0,250	2,25	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-09	16	15,500	0,250	13,3	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-10	1,25	1,660	0,100	3	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-11	1,25	1,660	0,100	1,5	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-12	1	1,315	0,109	1,5	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-13	1	1,315	0,109	5,8	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-14	0,25	0,540	0,088	-	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-15	1	1,315	0,109	5,79	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-16	1	1,315	0,109	1,5	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-17	1	1,315	0,109	5,5	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-18	0,5	0,840	0,109	-	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-19	1	1,315	0,109	48,6	Acero Carpenter 20 Mo-6
C-20	2,5	2,875	0,120	-	Acero Carpenter 20 Mo-6

#### 4.12. Especificaciones de los accesorios de las conducciones

**Tabla 4.12.**  
Especificaciones de los accesorios de las conducciones

Descripción	Unidades
Codo largo de 90° en Acero 316 L de diámetro nominal 0,75 in	1
Codo largo de 90° en Acero 316 L de diámetro nominal 20 in	4
Codo largo de 90° en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 20 in	3
Codo largo de 90° en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 18 in	1
Codo largo de 90° en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1 in	6
Té en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1 in	1
Té en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1,25 in	1



#### 4.13. Especificaciones de las válvulas

**Tabla 4.13.**  
Especificaciones de las válvulas

<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
Válvula compuerta en Acero 316 L de diámetro nominal 20 in	4
Válvula compuerta en Acero 316 L de diámetro nominal 18 in	4
Válvula compuerta en Acero 316 L de diámetro nominal 0,75 in	4
Válvula compuerta en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1 in	12
Válvula compuerta en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 20 in	4
Válvula de globo en Acero 316 L de diámetro nominal 0,75 in	6
Válvula de globo en Acero 316 L de diámetro nominal 0,5 in	1
Válvula de seguridad en Acero 316 L	1

#### 4.14. Especificaciones de los equipos de control

**Tabla 4.14.**  
Especificaciones de los equipos de control

<b>Descripción</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Unidades</b>
Sensor de temperatura tipo termopar	RS		12
Sensor óptico de nivel	Kobold	CPT	6
Sensor de caudal tipo de área variable	Kobold	BGN	13
Densímetro	Kobold	DWF	3
Controlador de procesos avanzados	ABB	C355	13
Selector de alta	SIL	112-21A	1
Convertidor intensidad-presión	Omega	IP210	7

Fdo. Miguel Tinoco Rivas

## **E. PRESUPUESTO**

## ÍNDICE

<b>1. Consideraciones iniciales.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Introducción .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Estado de las mediciones .....</b>	<b>7</b>
3.1. Estado de mediciones .....	7
3.1.1. Presupuestos parciales .....	10
3.1.2. Presupuesto de ejecución material (P.E.M.).....	12
3.1.3. Presupuestos de ejecución por contrata (P.E.C.).....	13
<b>4. Costes generales .....</b>	<b>14</b>
4.1. Costes de fabricación .....	14
4.1.1. Costes de la materia prima .....	14
4.1.2. Costes de mano de obra directa .....	14
4.1.3. Costes de mano de obra indirecta .....	15
4.1.4. Honorario de los proyectistas .....	15
4.1.5. Servicios generales.....	15
4.2. Costes de gestión .....	17
4.2.1. Gastos comerciales .....	17
4.3. Coste neto anual .....	17
<b>5. Estudio económico.....</b>	<b>18</b>
5.1. Ingreso Anual Neto.....	18
5.2. Beneficio Bruto Anual .....	18
5.3. Beneficio Neto Anual.....	18
5.4. Rentabilidad .....	20
5.5. Periodo de amortización .....	20

## CAPÍTULO 1: Consideraciones iniciales

En este documento se estimará el presupuesto general de ejecución del Proyecto **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol”**. Dicho presupuesto se realizará tomando una serie de consideraciones: así, el inmovilizado será el correspondiente a la suma de los quipos del presente Proyecto Fin de Carrera, y los costes de fabricación serán los de aquellas actividades y servicios que use dicho proceso, pero existen algunos costes de fabricación que se estimarán de distinta manera.

Estos costes que poseen un tratamiento distinto son debidos a que son gastos de la planta en su conjunto (personal directo y de contrata) o porque existe un uso compartido de dicho servicio (el vapor de agua que proviene de la **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”** que es usado en la **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol”**, para después retornar al comienzo de la planta).

Para el primer coste (el del personal) se usará como propio el de toda la planta. Esto se debe a que no se puede estimar con precisión la cantidad y dedicación del personal de la planta en el presente Proyecto Fin de Carrera.

El segundo coste, debido a que el vapor le viene suministrado por la **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”** y después retorna a su origen otra vez, el coste de dicho vapor será prácticamente nulo (se compraría y después se vendería al mismo o casi el mismo precio). Por tanto, dicho coste se anularía.

Además de estos costes, al usar como materia prima el presente Proyecto Fin de Carrera el metanol que le suministra la primera parte de la planta, para la obtención de los costes, se realizará la suposición de que dicho metanol “se compra” a la **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”**, aunque dicho gasto no existe en la realidad debido a pertenecer a la misma empresa.

## CAPÍTULO 2: Introducción

Toda actividad, industrial, comercial, de servicios o de cualquier otro tipo, está sujeta a consideraciones económicas enmarcadas en un escenario económico concreto. En cuanto a la industria, todo proceso novedoso, ampliaciones de plantas ya existentes o la instalación de una nueva planta deben cumplir unos criterios de viabilidad técnica y viabilidad económica para poder llevarse a cabo.

Por tanto, para que la planta en estudio se pueda llevar a cabo si su aspecto económico es favorable. Para la instalación de la planta se requiere de una inversión, y a cambio de ésta se van obteniendo ingresos en forma de ventas, las cuales deben ofrecer un excedente adecuado sobre los costos (es decir, unos beneficios) para que el proceso sea favorable económicamente.

Guthrie publicó en 1969 una de las mejores recopilaciones que se tengan sobre estimaciones de costos. Para el manejo de esta información, se divide la planta en módulos. Esta técnica se emplea para estimar el costo de cada unidad instalada o de la planta instalada. La información del artículo se basó en 42 proyectos de plantas de procesos, usándose este método para evaluaciones económicas en varios trabajos en el área de síntesis de procesos.

Aunque el trabajo de Guthrie incluye la posibilidad de estimar módulos como edificios, oficinas administrativas, terrenos y desarrollo del lugar, los módulos de equipo de proceso son los que representan el mayor interés y utilidad en nuestro caso, por lo que son los que se expondrán en esta sección. Los módulos de equipo consisten de una combinación de varios elementos de costo, tales como:

- Costo de equipo ( $f_{ob}$ )
- Material directo
- Mano de obra directa en campo
- Costo directo de material y mano de obra
- Costos indirectos
- Costo del módulo desnudo
- Costo del módulo total

El método comienza con la estimación de un costo base en función de alguna dimensión del equipo. Ese costo base implica acero al carbón como material de construcción, una geometría base del equipo, una presión de operación moderada y un año de base de 1968. Ese costo debe corregirse luego al incorporar los datos de material de construcción, geometría, presión y año para la estimación del equipo deseado. Para cada módulo, se incluyen tablas que contienen las ecuaciones básicas de estimación de inversiones, así como los valores de los factores de ajuste respectivos.

Otra parte del ajuste implica el uso de factores de módulo, aplicables al costo base para luego corregir ese valor por el efecto de las características de la unidad deseada.

Una de las maneras más simples de procesar la información es la siguiente:

- a) Obtener el costo base para una geometría base, acero al carbón y 1968,  $C_b$ .
- b) Ajustar el costo base por efecto de la geometría requerida para el equipo y el material de construcción. Se obtiene el costo  $C_{fob}$ , que implica que no se incluyen costos de transporte y por la base de datos usados este costo se aplica al año 1968.
- c) Para obtener el costo del módulo:
  - Usar el factor del módulo desnudo:  $C_b \cdot \text{factor} = C_{md}$
  - Sumar diferencia entre la unidad deseada y la base:

$$C_{md} + (C_{fob} - C_b) = C_{mda}$$

- Ajustar el costo hacia el año deseado usando índices de costos como los del "Chemical Engineering"
- Añadir contingencias. Guthrie recomienda usar un factor del 15%.

$$C_{módulo} = 1,15 C_{mda}$$

Este tipo de información se puede procesar para producir relaciones matemáticas con las que se puedan estimar los costos de diferentes unidades de proceso. Este enfoque se ha incorporado a algunos simuladores de procesos que ofrecen la posibilidad de estimación de costos.

Para determinar la economía de un proceso se tiene en cuenta tanto el coste de inmovilizado como el de la mano de obra para la construcción y, montaje de los equipos en la instalación.

El coste de inmovilizado hay que tener en cuenta:

- Maquinaria y equipos
- Tuberías
- Válvulas y accesorios
- Instrumentos de medición y control
- Aislamientos

En primer lugar se determinará el Presupuesto de Ejecución Material (P.E.M.), referente al precio de los equipos y montaje de los mismos. Se incluirá el Beneficio Industrial y los Gastos Generales obteniendo, el Presupuesto de Ejecución por Contrata (P.E.C.). Hay que contabilizar el IVA, siendo un 16% del P.E.C.

Posteriormente, se realiza un análisis del gasto anual que supone el funcionamiento del proceso, considerando los costes de fabricación así como los de gestión. Las partidas que incluyen estos costes se detallarán más tarde.

Por último, hay que garantizar la viabilidad económica de la línea de proceso, para ello se realiza un estudio económico considerando los beneficios y la rentabilidad, además del periodo necesario para la amortización de la línea de producción proyectada.



## CAPÍTULO 3: Estado de mediciones

Los requisitos básicos que debe cumplir un estado de mediciones son los siguientes:

- a) Definir y determinar las unidades de cada partida o unidad de obra.
- b) Incluir el número de unidades y definir las características, modelos, tipos y dimensiones de cada partida de obra o elemento del objeto del Proyecto.
- c) Utilizar el concepto de partida alzada cuando la unidad no sea fácilmente desglosable.
- d) Contener un listado completo de las partidas de obra.
- e) Subdividir según las partes más significativas del Proyecto.
- f) Servir de base para la realización del presupuesto.

En base a estos requisitos, y estructurándose en los siguientes puntos, se elabora el estado de mediciones propuesto para el presente Proyecto:

1. Unidades de proceso.
2. Equipos de impulsión.
3. Tuberías.
4. Válvulas y accesorios.
5. Control e instrumentación.
6. Aislamiento.

### 3.1. Estado de mediciones

- **Unidades de proceso**

DESCRIPCIÓN	UNIDADES
Intercambiador de carcasa y tubos, con un solo tubo y un paso por carcasa. Área 17,493 m <sup>2</sup> y Número de tubos 352 de acero Carpenter 20 Mo-6. Carcasa de diámetro exterior 0,991 m de acero AISI 316L. Los tubos poseen una longitud de 0,61 m y un diámetro externo 0,03175 m.	1
Intercambiador de carcasa y tubos, con un solo tubo y un paso por carcasa. Área 1,807 m <sup>2</sup> y Número de tubos 73 de acero AISI 316L. Carcasa de diámetro exterior 0,4953 m de acero AISI 316L. Los tubos poseen una longitud de 0,305 m y un diámetro externo 0,03175 m.	1
Intercambiador de carcasa y tubos, con un solo tubo y un paso por carcasa. Área 16,304 m <sup>2</sup> y Número de tubos 252 de acero Carpenter 20 Mo-6. Carcasa de diámetro exterior 0,8382 m de acero AISI 316L. Los tubos poseen una longitud de 0,762 m y un diámetro externo 0,03175 m.	1
Intercambiador de carcasa y tubos, con un solo paso por tubo y un paso por carcasa. Área 3,132 m <sup>2</sup> y Número de tubos 26 de Carpenter 20 Mo-6. Carcasa de diámetro exterior 0,203 m de acero AISI 316L. Los tubos poseen una longitud de 2,134 m y un diámetro externo 0,0191 m.	1
Reactor multitubular catalizado, con un solo paso por tubo y un paso por carcasa. Área 145,93 m <sup>2</sup> y Número de tubos 600 de acero Carpenter 20 Mo-6. Carcasa de diámetro exterior 0,965 m de acero AISI 316L. Los tubos poseen una longitud de 3,05 m y un diámetro externo 0,0254 m.	1
Columna de absorción de relleno vertical de anillos Raschig de Acero Inoxidable de 1 in. Columna de Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro interior 0,91 m y altura 5,79 m.	1

DESCRIPCIÓN	UNIDADES
Mezclador de techo flotante cubierto de Acero Carpenter 20 Mo-6 de volumen total 1,667 m <sup>3</sup> y volumen útil 1,504 m <sup>3</sup> . Altura de 1,295 m, diámetro interior 1,28 m, 4 placas deflectoras de espesor 0,37 m. Turbina de 0,457 m de diámetro, anchura de hélice de 0,91 m y motor de 1491 W.	1
Depósito de techo flotante cubierto de Acero Carpenter 20 Mo-6 de volumen total 160,128 m <sup>3</sup> y volumen útil 144,338 m <sup>3</sup> . Altura de 5,49 m, diámetro interior 6,096 m.	1
Depósito de techo flotante cubierto de Acero Carpenter 20 Mo-6 de volumen total 520,416 m <sup>3</sup> y volumen útil 252,591 m <sup>3</sup> . Altura de 7,92 m, diámetro interior 9,144 m.	4

- Sistemas de impulsión**

DESCRIPCIÓN	UNIDADES
Bomba centrífuga Liquiflo 620 Sealed	8
Soplante Aerzen GR/Bra/GRb	6

- Tuberías**

DESCRIPCIÓN	LONGITUD (m)
Tubería en Acero 316 L de diámetro nominal 0,75 in	24,6
Tubería en Acero 316 L de diámetro nominal 18 in	3
Tubería en Acero 316 L de diámetro nominal 20 in	17,3
Tubería en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1 in	68,69
Tubería en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1,25 in	4,5
Tubería en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 16 in	13,3
Tubería en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 18 in	2,25
Tubería en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 20 in	17,3

- Válvulas y accesorios**

DESCRIPCIÓN	UNIDADES
Válvula compuerta en Acero 316 L de diámetro nominal 20 in	4
Válvula compuerta en Acero 316 L de diámetro nominal 18 in	4
Válvula compuerta en Acero 316 L de diámetro nominal 0,75 in	4
Válvula compuerta en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1 in	12
Válvula compuerta en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 20 in	4
Válvula de globo en Acero 316 L de diámetro nominal 0,75 in	6
Válvula de globo en Acero 316 L de diámetro nominal 0,5 in	1
Válvula de seguridad en Acero 316 L	1
Codo largo de 90° en Acero 316 L de diámetro nominal 0,75 in	1
Codo largo de 90° en Acero 316 L de diámetro nominal 20 in	4
Codo largo de 90° en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 20 in	3
Codo largo de 90° en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 18 in	1
Codo largo de 90° en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1 in	6
Té en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1 in	1
Té en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1,25 in	1

- **Control e instrumentación**

DESCRIPCIÓN	UNIDADES
Sensor de temperatura tipo termopar marca RS	12
Sensor óptico de nivel marca Kobold modelo CPT	6
Sensor de caudal tipo de área variable marca Kobold modelo BGN	13
Densímetro marca Kobold modelo DWF	3
Controlador de procesos avanzados marca ABB modelo C355	13
Selector de alta marca SIL modelo 112-21A	1
Convertidor intensidad-presión marca Omega modelo IP210	7

- **Aislamiento**

- 

- **Aislamiento de equipos**

El aislante que se emplea en todas y cada una de las unidades de proceso es lana de roca. El espesor del material de aislamiento empleado va a depender de la temperatura a la que se encuentre el equipo. Los valores obtenidos se exponen a continuación:

EQUIPO	DESCRIPCIÓN	DIMENSIÓN (m <sup>2</sup> )
Intercambiador IC-01	Lana de roca de 80 mm de espesor cubierta con capa adhesiva de protección de aluminio	0,47
Intercambiador IC-02	Lana de roca de 80 mm de espesor cubierta con capa adhesiva de protección de aluminio	0,059
Reactor R-01	Lana de roca de 50 mm de espesor cubierta con capa adhesiva de protección de aluminio	2,23
Intercambiador IC-03	Lana de roca de 50 mm de espesor cubierta con capa adhesiva de protección de aluminio	0,42
Absorbedor A-01	Lana de roca de 50 mm de espesor cubierta con capa adhesiva de protección de aluminio	3,77
Intercambiador IC-04	Lana de roca de 50 mm de espesor cubierta con capa adhesiva de protección de aluminio	0,069

- **Aislamiento de conducciones**

Se procede a aislar todas las tuberías así como los accesorios que forman parte de estas líneas para prevenir posibles goteos y derrames de las corrientes que éstas transportan debido a la existencia o aparición de grietas o fisuras en la superficie de las tuberías. El espesor apropiado de aislante se determina en base a la temperatura de trabajo y el diámetro de la conducción.

DESCRIPCIÓN	LONGITUD (m)
Lana de roca de 40 mm de espesor cubierta con capa adhesiva de protección de aluminio	111,29
Lana de roca de 50 mm de espesor cubierta con capa adhesiva de protección de aluminio	5,25
Lana de roca de 80 mm de espesor cubierta con capa adhesiva de protección de aluminio	24,6

### 3.1.1. Presupuestos parciales

En este apartado se indican los precios unitarios de cada uno de los equipos, y se destaca que no se considerarán los costes derivados de obra civil y que las unidades se dispondrán al aire libre debido a que las condiciones climatológicas así lo permiten al ser bastante benévolas.

- **Unidades de proceso**

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	PRESUPUESTO PARCIAL (€)
Intercambiador de calor IC-01	1	42939,79	42939,79
Intercambiador de calor IC-02	1	29342,19	5439,04
Reactor R-01	1	171759,14	171759,14
Intercambiador de calor IC-03	1	5439,04	36498,82
Absorbedor A-01	1	152858,57	397291,03
Intercambiador de calor IC-04	1	5295,01	5295,01
Mezclador M-01	1	10623,29	10623,29
Depósito Rundown	1	167982,66	167982,66
Depósito de almacenamiento	4	426104,30	1664417,2
<b>PRESUPUESTO PARTIDA UNIDADES DE PROCESO</b>			<b>2502246,87 €</b>

- **Equipos de impulsión**

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	PRESUPUESTO PARCIAL (€)
Bomba centrífuga	8	1568,31	9409,86
Soplante	6	376,22	3009,76
<b>PRESUPUESTO PARTIDA EQUIPOS DE IMPULSIÓN</b>			<b>12419,62 €</b>

- **Tuberías**

DESCRIPCIÓN	UNIDADES (m)	PRECIO UNITARIO (€/m)	PRESUPUESTO PARCIAL (€)
Tubería en Acero 316 L de diámetro nominal 0,75 in	24,6	31,15	766,29
Tubería en Acero 316 L de diámetro nominal 18 in	3	634,17	1902,51
Tubería en Acero 316 L de diámetro nominal 20 in	17,3	723,38	12514,47
Tubería en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1 in	66,62	76,11	5070,45
Tubería en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1,25 in	4,5	87,33	392,99
Tubería en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 16 in	13,3	1006,93	13392,17
Tubería en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 18 in	2,25	1118,09	2515,70
Tubería en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 20 in	17,3	1316,16	22769,57
<b>PRESUPUESTO PARTIDA TUBERÍAS</b>			<b>59324,15 €</b>

• **Válvulas y accesorios**

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	PRESUPUESTO PARCIAL (€)
Válvula compuerta en Acero 316 L de diámetro nominal 20 in	4	605,15	2420,60
Válvula compuerta en Acero 316 L de diámetro nominal 18 in	4	517,90	2071,60
Válvula compuerta en Acero 316 L de diámetro nominal 0,75 in	4	25,05	100,20
Válvula compuerta en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1 in	12	58,12	697,44
Válvula compuerta en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 20 in	4	1063,84	4255,36
Válvula de globo en Acero 316 L de diámetro nominal 0,75 in	6	253,25	1519,50
Válvula de globo en Acero 316 L de diámetro nominal 0,5 in	1	180,85	180,85
Válvula de seguridad en Acero 316 L	1	4365,00	4365,00
Codo largo de 90° en Acero 316 L de diámetro nominal 0,75 in	1	25,10	25,10
Codo largo de 90° en Acero 316 L de diámetro nominal 20 in	4	637,95	2551,80
Codo largo de 90° en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 20 in	3	1214,40	3643,20
Codo largo de 90° en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 18 in	1	996,15	996,15
Codo largo de 90° en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1 in	6	75,83	454,98
Té en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1 in	1	72,28	72,28
Té en Acero Carpenter 20 Mo-6 de diámetro nominal 1,25 in	1	93,46	93,46
<b>PRESUPUESTO PARTIDA VÁLVULAS Y ACCESORIOS</b>			<b>23447,52 €</b>

• **Control e instrumentación**

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	PRESUPUESTO PARCIAL (€)
Sensor de temperatura	12	48,07	576,84
Sensor de nivel	6	125,94	755,64
Sensor de caudal	13	269,34	3501,19
Densímetro	3	499,73	1499,19
Controlador	13	460,36	5984,68
Selector de alta	1	250,25	250,25
Convertidor I/P	7	50,49	353,43
<b>PRESUPUESTO PARTIDA CONTROL E INSTRUMENTACIÓN</b>			<b>12921,45 €</b>

- **Aislamiento**

- **Aislamiento de equipos**

EQUIPO	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO (€/m <sup>2</sup> )	PRESUPUESTO PARCIAL (€)
Intercambiador IC-01	Lana de roca de 80 mm de espesor	6,27	2,95
Intercambiador IC-02	Lana de roca de 80 mm de espesor	6,27	0,37
Reactor R-01	Lana de roca de 50 mm de espesor	5,58	12,44
Intercambiador IC-03	Lana de roca de 50 mm de espesor	5,58	2,34
Absorbedor A-01	Lana de roca de 50 mm de espesor	5,58	258,24
Intercambiador IC-04	Lana de roca de 50 mm de espesor	5,58	21,04
<b>COSTE TOTAL DE LA PARTIDA AISLAMIENTO DE EQUIPOS</b>			<b>276,73 €</b>

- **Aislamiento de las conducciones**

DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO (€/m)	PRESUPUESTO PARCIAL (€)
Lana de roca de 40 mm de espesor	4,68	511,15
Lana de roca de 50 mm de espesor	5,58	29,30
Lana de roca de 80 mm de espesor	6,27	154,24
<b>COSTE TOTAL PARTIDA AISLAMIENTO CONDUCCIONES</b>		<b>694,69 €</b>

### 3.1.2. Presupuesto de Ejecución Material (P.E.M.)

PARTIDAS	COSTE (€)
<b>Unidades de proceso</b>	<b>2502246,87</b>
<b>Equipos de impulsión</b>	<b>12419,62</b>
<b>Tuberías</b>	<b>59324,15</b>
<b>Válvulas y accesorios</b>	<b>23447,52</b>
<b>Control e instrumentación</b>	<b>12921,45</b>
<b>Aislamiento</b>	<b>971,42</b>
<b>P.E.M.</b>	<b>2611331,03 €</b>

El PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL del Proyecto “Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Proceso para la obtención de formaldehído a partir de metanol”, asciende a la cantidad de “DOS MILLONES SEISCIENTOS ONCE MIL TRESCIENTOS TREINTA Y UN EUROS CON TRES CÉNTIMOS”

### 3.1.3. Presupuesto de ejecución por contrata (P.E.C.)

CONCEPTO	COSTE (€)
P.E.M.	2611331,03
Gastos Generales (13%)	339473,03
Beneficio Industrial (6%)	156679,86
I.V.A. (16%)	417812,96
P.E.C.	3525296,89 €

El PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA del Proyecto “Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Proceso para la obtención de formaldehído a partir de metanol” asciende a la cantidad de “TRES MILLONES QUINIENTOS VEINTICINCO MIL DOSCIENTOS NOVENTA Y SEIS EUROS CON OCHENTA Y NUEVE”.

## CAPÍTULO 4: Costes generales

Los Costes Generales se determinan como la aportación de los Costes de Fabricación y los Costes de Gestión de la línea de proceso obteniéndose así los Costes de Producción

En los Costes de Fabricación hay que considerar:

- Materias Primas.
- Mano de obra directa.
- Mano de obra indirecta.
- Honorarios de proyecto y dirección de montaje.
- Servicios generales.

En cuanto a los Costes de Gestión se consideran:

- Gastos Comerciales.

### 4.1. Costes de Fabricación

#### 4.1.1. Coste de la materia prima

La materia prima básica de la planta es el gas natural, pero del Proyecto Fin de Carrera “**Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Proceso para la obtención de formaldehído a partir de metanol**”, como se comentó al inicio del presente **Presupuesto**, será el metanol. Por ello se usará el “coste ficticio” de compra de dicho metanol.

Materia prima	Consumo (T <sub>m</sub> /año)	Precio de la materia prima (€/T <sub>m</sub> )	Coste materia prima (€/año)
Metanol	9000	152,55	1372950

Además del metanol se debe incluir como materia prima el catalizador usado, considerando que la vida útil de dicho catalizador es de un año:

Unidad	Consumo (kg)	Coste Unitario (€/kg)	Coste anual (€/año)
Reactor R-01	500	565,00	282500

#### 4.1.2. Coste de mano de obra directa

Se determina teniendo en cuenta que el personal que forma parte de la plantilla se compone de operarios, técnicos y otros profesionales.

Se recoge los trabajadores que estarán contratados en la planta en su conjunto (debido a las razones expuestas al comienzo del presente **Presupuesto**) en la siguiente tabla:



Puesto	Nº Trabajadores	Salario bruto anual por persona (€/año)	Total (€/año)
Director/a General	1	90000	90000
Gerente	1	70000	70000
Directivos	11	50000	550000
Administrativos	19	18000	342000
Encargados	4	25000	100000
Operarios de Laboratorio	2	20000	40000
Operarios de Mantenimiento	15	22500	337500
Operarios de Planta	45	16000	720000

Estos costes suponen 2.249.500 €/año.

#### 4.1.3. Costes de mano de obra indirecta

Al igual que en el caso de la mano de obra directa, se presenta una tabla resumen que permite apreciar el coste derivado de esta partida.

Puesto	Nº Trabajadores	Salario bruto anual por persona (€/año)	Total (€/año)
Seguridad	3	15000	45000
Encargado Limpieza	3	13000	39000
Personal contra Incendios	3	18000	54000

Estos costes suponen 138.000 €/año.

#### 4.1.4. Honorario de los proyectistas y la dirección de montaje

Esta partida se compone de los siguientes costes:

- Proyecto.
- Dirección de obra.
- Gestión de compra de equipos.

Esta partida se contabiliza como un 7% del Presupuesto de Ejecución por Contrata (P.E.C.)

Este coste supone:

$$H_{proyecto} = 0,07 \cdot 3525296,89 \text{ €} = 246770,78 \text{ €}$$

#### 4.1.5. Servicios generales

El consumo de servicios generales incluye el agua de refrigeración empleada en los intercambiadores de calor, la empleada en los reactores y en el mezclador y el punto de mezcla.

## Agua

El precio del agua de servicio en el municipio de San Roque, donde estará instalada la línea de proceso, tiene un valor de 0,69 €/m<sup>3</sup>.

Unidad	Consumo (kg/s)	Consumo Anual (m <sup>3</sup> )	Coste Unitario (€/m <sup>3</sup> )	Coste Anual (€/año)
Reactor R-01	4,190	119465,28	0,69	82431,04
Intercambiador IC-03	2,413	68799,46	0,69	47471,62
Intercambiador IC-04	0,977	27856,22	0,69	19220,79
Mezclador M-01	0,258	7356,10	0,69	5075,71
Punto mezcla	0,056	1596,67	0,69	1101,70
<b>COSTE TOTAL PARTIDA AGUA</b>				<b>155300,87 €/año</b>

## Electricidad

El consumo de energía eléctrica que suponen las unidades de bombeo, soplantes y agitación, se muestra en la siguiente tabla:

UNIDAD	CONSUMO (W)
Bomba B-01	25
Bomba B-02	25
Bomba B-03	70
Bomba B-04	20
Soplante V-01	7800
Soplante V-02	7400
Soplante V-03	7600
Agitador M-01	1491
<b>CONSUMO TOTAL (W)</b>	<b>24431</b>

Sabiendo que estos equipos funcionarán 24 horas al día durante 330 días al año:

$$24,431kW \cdot 24 \frac{h}{día} = 586,34 kW \cdot h/día$$

Siendo la tarifa industrial de 0,11248 €/kW·h y para un funcionamiento de la línea de proceso de 330 días al año, el consumo anual asciende a:

$$586,34 \frac{kW \cdot h}{día} \cdot 0,11248 \frac{€}{kWh} \cdot 330 \frac{día}{año} = 21764,15 €/año$$

Los Costes de Fabricación suponen un total de 5013465,02 €.

## 4.2. Costes de gestión

### 4.2.1. Gastos comerciales

Los costes comerciales suponen un 4% de la partida de Costes de Fabricación, esto es:

$$5013465,02 \frac{\text{€}}{\text{año}} \cdot 0,04 = 200538,60 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

## 4.3. Coste neto anual

El Coste Neto Anual se determina a partir de los Costes de Fabricación y de Gestión, lo cuales suponen los Costes de Producción.

$$\text{Costes de producción} = 5013465,02 \frac{\text{€}}{\text{año}} + 200538,60 \frac{\text{€}}{\text{año}} = 5214003,62 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

## CAPÍTULO 5: Estudio económico

### 5.1. Ingreso Anual Neto

Los beneficios que se obtendrán en la línea de proceso diseñada provendrán de la venta del formaldehído al 37%. La producción de formaldehído proyectada asciende a 22.00 T<sub>m</sub>/año. Para hallar el ingreso por la venta del producto se usará la siguiente expresión:

$$V = p \cdot q$$

Siendo:

p: precio de venta del producto (€/T<sub>m</sub>).

q: volumen de producción (T<sub>m</sub>/año).

Se dará lugar a unos ingresos anuales debida a las actividades productivas de la línea de dicho proceso:

Producto	Producción (T <sub>m</sub> /año)	Precio del producto (€/T <sub>m</sub> )	Ingreso anual (€/año)
Formaldehído	22000	621,50	13673000
<b>TOTAL</b>			<b>13673000 €/año</b>

### 5.2. Beneficio Bruto Anual

Podemos conocer el beneficio bruto anual ya que los términos del gasto anual neto y el ingreso anual neto son conocidos:

$$R = \text{Ingreso neto anual} - \text{Coste neto anual}$$

$$R = 13673000 \text{ €} - 5214003,62 \text{ €} = 8.458.996,38 \text{ €}$$

### 5.3. Beneficio Neto anual

Este parámetro se determina a través del Beneficio Bruto Anual, R, después de deducir impuestos por medio de la expresión:

$$P = R - e \cdot I_f - (R - d \cdot I_f) \cdot t$$

Donde:

P: Beneficio Neto Anual.

R: Beneficio Bruto Anual.

e: factor de amortización (calculado para recuperar la inversión en el inmovilizado) expresado en €/ € año.

I<sub>f</sub>: valor del capital inmovilizado.

d: factor anual de pérdida del inmovilizado (€/€ año).

t: se corresponde con el término de impuestos (€/€ recibo).

Se determinan los parámetros no conocidos de la expresión anterior.

*Factor de amortización, e*

Se considera una amortización no lineal a través de la expresión:

$$e = \frac{i}{\exp(i \cdot n) - 1}$$

Donde:

i: rentabilidad promedio, en este caso se considera 0,11 €/año (Rudd y Watson, 1976).

n: la vida esperada para el proyecto desde el punto de vista de la amortización.

Para el caso que nos ocupa la vida esperada para el proyecto es de 5 años desde el punto de vista de la amortización, por tanto se obtiene:

$$e = \frac{0,11}{\exp(0,11 \cdot 5) - 1} = 0,15$$

*Factor anual de pérdida de valor del inmovilizado, d*

Este factor se estima en un 10% anual, es decir, 0,1 €/€año (Rudd y Watson, 1976).

*Impuestos, t*

Se consideran un valor de los impuestos de 0,35 €/€ recibido.

*Valor del capital inmovilizado, If*

Se determino en el capítulo 2 del presente Presupuesto, se corresponde con el Presupuesto de ejecución por Contrata, y su valor asciende a 3525296,89 €. Conocidos todos estos datos, se sustituyen en la ecuación anterior y se tiene:

$$P = 8458996,38 \text{ €/año} - 0,15 \text{ €/€año} \cdot 3525296,89 \text{ €} - (8458996,38 \text{ €/año} - 0,1 \text{ año}^{-1} \cdot 3525296,89 \text{ €}) \cdot 0,35 \text{ €/€}$$

$$P = 5092880,58 \text{ €}$$

## 5.4. Rentabilidad

Para hallar la rentabilidad o tasa de retorno se recurre a la expresión:

$$i = \frac{\text{Beneficio Neto obtenido}}{\text{Capital fijo invertido promedio}} \cdot 100$$

$$i = \frac{5092880,58}{3525296,89} \cdot 100 = 144,47 \%$$

Esta rentabilidad es muy alta, pero esto es debido a que el Proyecto **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol”** es el proceso donde se obtiene el producto principal, por lo que es normal que la rentabilidad sea muy alta al poseer altos ingresos y pocos costes. Si se realizara el presupuesto en forma conjunta con el Proyecto **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”** se vería que la rentabilidad baja hasta niveles normales (un poco superiores al 15%) debido a un gran aumento en los costes. Así se consigue un valor de rentabilidad más frecuente a pesar de que existe un pequeño aumento de los ingresos (debido a la inclusión de la venta del metanol y el hidrógeno).

### 5.5. Periodo de amortización

El periodo de amortización de la línea de producción se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$P_{amor} = \frac{\text{Capital fijo invertido}}{\text{Beneficio bruto anual}}$$

Todos los datos son conocidos, sustituyendo en la ecuación anterior se tiene:

$$P_{amor} = \frac{3525296,89 \text{ €}}{8458996,38 \text{ €/año}} = 0,42 \text{ años}$$

Al igual que ocurre con la rentabilidad, este periodo de amortización no es normal, pero las razones por las que es tan anormalmente pequeño su valor son las mismas que las explicadas en la rentabilidad. Por ello, si se realizara dicho cálculo con ambos Proyectos Fin de Carrera (**“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol”** y **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”**) integrados, el valor del periodo de amortización es más frecuente (sobre los 5 años).

Como conclusión, se puede observar que el Proyecto Fin de Carrera **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 2: Proceso de obtención de formaldehído a partir de metanol”** es un proceso muy rentable (es el más rentable dentro de la planta en su conjunto), por lo que es perfectamente posible su instalación en la práctica. Pero siempre hay que considerar que dicho proceso está supeditado a la instalación del Proyecto **“Diseño de una planta de producción de formaldehído. Parte 1: Proceso de obtención de metanol a partir de gas natural”**, y que este proceso es el que disminuye la rentabilidad hasta valores más frecuentes, pero aún así, sigue siendo rentable la instalación ( $i > 15\%$ ).



